

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Evaluación de la calidad de agua en la planta de tratamiento de
agua potable de Villa Rica – Oxapampa**

Por:

Daniel Eduardo Cama Luque
Melissa Guadalupe Huasco Cuchacha

Asesor

Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe

Lima, Diciembre de 2019

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Dr. Noe Benjamin Pampa Quispe, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE VILLA RICA – OXAPAMPA" constituye la memoria que presentan los bachilleres: Daniel Eduardo Cama Luque y Melissa Guadalupe Huasco Cuchacha para aspirar al título profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, 30 de diciembre del año 2019.



Dr. Noe Benjamin Pampa Quispe

Evaluación de la calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica – Oxapampa

TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO CALIFICADOR

Mg. Iliana del Carmen
Gutiérrez Rodríguez
Presidenta

Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga
Secretaria

Dr. Alex Rubén Huamán De La Cruz
Vocal

Mg. Joel Hugo Ferández Rojas
Vocal

Dr. Noe Benjamin Pampa Quispe
Asesor

Lima, 11 de diciembre de 2019

DEDICATORIA

A Dios nuestro padre quien permite que todas las cosas se hagan, por acompañarnos hasta el fin de este proceso.

Y en especial a mi madre que, aunque ya no esté presente es mi motivo para seguir adelante y dar lo mejor de mí, le dedico todos mis éxitos por haber sido una madre ejemplar.

Melissa G. Huasco Cuchacha.

A Dios quien permitió que se pueda concluir satisfactoriamente la presente investigación.

A mis queridos padres que me instruyeron en el camino de Dios y me apoyaron en todo momento de mi carrera para que pueda llegar a lograr mis metas.

Daniel Eduardo Cama Luque

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios quien permitió que el presente trabajo sea concluido a pesar de todas las pruebas que se tuvieron que superar.

A nuestros amigos más cercanos por ser quienes nos mantuvieron motivados y nos alentaron para no desanimarnos.

A la escuela de Ingeniería Ambiental que nos brindó las facilidades durante el proceso.

A nuestro asesor, Ph. D. Noe Benjamin Pampa Quispe por brindarnos su apoyo en todo momento, por mostrarse dispuesto a apoyar en horas de trabajo y fuera de ellas.

A nuestros dictaminadores por indicarnos el rumbo a seguir en el desarrollo de la tesis ahora presentada.

Índice general

CAPÍTULO I	EL PROBLEMA.....	16
1.	EL PROBLEMA	16
1.1.	Identificación del problema	16
1.1.1.	Planteamiento del problema	16
1.1.2.	Formulación de problema	18
1.2.	Justificación del problema	19
1.3.	Presuposición filosófica	20
1.4.	Objetivos.....	21
1.4.1.	Objetivo general	21
1.4.2.	Objetivos específicos.....	21
CAPÍTULO II	REVISIÓN DE LITERATURA.....	23
2.	REVISIÓN DE LITERATURA	23
2.1.	Antecedentes de la investigación	23
2.1.1.	Antecedentes internacionales.....	23
2.1.2.	Antecedentes nacionales	24
2.1.3.	Antecedentes locales	26
2.2.	Marco legal	26
2.2.1.	Ley general de servicios de saneamiento Ley N° 26338.....	27
2.2.2.	D.S. N° 023-2005-Vivienda. Texto Único Ordenado del Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento.....	27
2.2.3.	Ley de modernización de los servicios de saneamiento.....	27
2.2.4.	Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales R.J. N° 010-2016-ANA	28
2.2.5.	Reglamento nacional de edificaciones: Norma OS. 020 Plantas de tratamiento de agua para consumo humano	28
2.2.6.	Reglamento de calidad de agua para consumo humano	28
2.3.	Marco teórico.....	29
2.3.1.	Características físicas	30
2.3.2.	Características químicas	37
2.3.3.	Características microbiológicas	38
2.3.4.	Tipos de coagulante químico.....	39
2.3.5.	Planta de tratamiento de agua potable	45
2.3.6.	Procesos unitarios de plantas de tratamiento de agua potable con tecnología CEPIS filtración rápida	46
2.3.7.	Floculación	51
2.3.8.	Sedimentación.....	55
2.3.9.	Filtración.....	56
2.3.10.	Unidades de tratamiento de agua potable	56
2.3.11.	Filtros rápidos	63
2.4.	Marco conceptual	65
CAPÍTULO III	MATERIALES Y MÉTODOS.....	71
3.	Materiales y métodos	71
3.1.	Ámbito de investigación.....	71
3.1.1.	Clima	72
3.1.2.	Generalidades de la planta.....	73
3.1.3.	Componentes de la planta de tratamiento de agua potable	75
3.2.	Tipo de investigación.....	87
3.3.	Diseño de la investigación	87
3.4.	Materiales y equipos.....	87

3.5.	Procedimientos.....	90
3.5.1.	Descripción del flujograma	90
3.5.2.	Flujograma.....	93
3.6.	Análisis de datos	94
3.6.1.	Determinación de la temperatura ambiente.....	94
3.6.2.	Determinación de la precipitación en Villa Rica.....	94
3.6.3.	Estimación de la población y la demanda de agua potable	94
3.6.4.	Determinación de la calidad de agua en el afluente y efluente	96
3.6.5.	Control del caudal y volumen tratado de la planta	96
3.6.6.	Monitoreo de turbidez del agua	96
3.6.7.	Monitoreo de color del agua	97
3.6.8.	Monitoreo de la temperatura del afluente de agua	98
3.6.9.	Monitoreo del pH del agua.....	98
3.6.10.	Monitoreo de la conductividad del agua	99
3.6.11.	Monitoreo de la alcalinidad del agua	100
3.6.12.	Pruebas de tratabilidad para determinar el coagulante y dosis óptima.....	101
3.6.13.	Pruebas de tratabilidad con diferentes niveles de pH.....	105
3.6.14.	Pruebas de tratabilidad con polímero catiónico	106
3.6.15.	Pruebas de tratabilidad a diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad.....	109
3.6.16.	Pruebas de tratabilidad para determinar la tasa de decantación.....	110
3.6.17.	Diseño de superficie de respuesta	111
3.6.18.	Factores o variables para la investigación.....	112
3.6.19.	Propuesta de diseño de planta adecuado para la reducción de color y turbidez.	113
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		127
4.	Resultados y discusiones	127
4.1.	Resultados de temperatura ambiente.....	127
4.2.	Resultados de las precipitaciones en Villa Rica	127
4.3.	Resultados de la estimación de la población y demanda de agua potable 128	
4.4.	Resultados de la calidad del afluente y efluente.....	131
4.5.	Resultados del caudal y el volumen de agua tratado por la planta en el mes de enero	132
4.6.	Resultados del monitoreo de la turbidez del agua en la planta	134
4.6.1.	Turbidez del afluente	134
4.6.2.	Turbidez en la salida de las unidades de tratamiento enero y parte de febrero	138
4.7.	Resultados del monitoreo de color en la planta en el mes de enero y parte de febrero	143
4.7.1.	Color en el afluente	143
4.7.2.	Color en la salida de las unidades de tratamiento	144
4.8.	Resultados del monitoreo de la temperatura del agua en el mes de enero y parte de febrero	148
4.9.	Resultados del monitoreo del pH del agua.....	149
4.10.	Resultados del nivel de conductividad en el agua	153
4.11.	Resultados del nivel de la alcalinidad del afluente	155
4.12.	Resultados de la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio granulado tipo A) respecto a turbidez en la fuente	156

4.13.	Resultados de tratabilidad para determinar coagulante y dosis óptima	159
4.13.1.	Resultados de las pruebas de tratabilidad con una muestra de agua con turbidez baja	159
4.13.2.	Pruebas de tratabilidad con una muestra de agua con turbidez alta	167
4.14.	Resultados de tratabilidad para determinación de pH óptimo de floculación	174
4.15.	Resultados de tratabilidad con polímero catiónico como ayudante de coagulación y floculación	177
4.15.1.	Resultados de la prueba de tratabilidad aplicando polímero catiónico como ayudante de coagulación	177
4.15.2.	Resultados de la prueba de tratabilidad aplicando polímero catiónico como ayudante de floculación	181
4.16.	Resultados de las pruebas de tratabilidad para determinar tiempos y gradientes	184
4.16.1.	Resultados de las pruebas de tratabilidad para la muestra con turbidez baja	184
4.16.2.	Resultados de las pruebas de tratabilidad para la muestra con turbidez alta	192
4.17.	Resultados de la prueba de tratabilidad para determinar la tasa de decantación	200
4.18.	Resultados del diseño experimental Box-Behnken	206
4.18.1.	Resultados de las Pruebas para agua con color y turbidez bajos	206
4.18.2.	Resultado de las pruebas para agua con color y turbidez altos	215
4.19.	Resultados de evaluación de planta	223
4.19.1.	Unidad de mezcla rápida	223
4.19.2.	Unidades de floculación	232
4.19.3.	Unidades de decantación	240
4.19.4.	Unidades de filtración	256
4.19.5.	Sistema de cloración	262
4.19.6.	Lecho de secado	264
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES	265
CAPÍTULO VI	RECOMENDACIONES	268
CAPÍTULO VII	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	269
CAPÍTULO VIII	ANEXOS	278

Índice de Tablas

Tabla 1.	Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica.	29
Tabla 2.	Límites máximos permisibles de parámetros microbiológicos y parasitológicos (D.S. 031-2010-SA)	29
Tabla 3.	Clasificación de los contaminantes presentes en el agua	30
Tabla 4.	Tipos de sulfato de Aluminio y características	41
Tabla 5.	Ubicación geográfica del lugar de ejecución del proyecto	72
Tabla 6.	Resumen de características y parámetros de mezclador para las condiciones de operación	76
Tabla 7.	Características y parámetros de operación considerado en el diseño del floculador	78
Tabla 8.	Características y parámetros de operación actuales del floculador	79
Tabla 9.	Características de la zona de recolección de agua decantada	82
Tabla 10.	Parámetros de operación del filtro en función al caudal	83
Tabla 11.	Características del medio filtrante	84
Tabla 12.	Especificaciones de la capa soporte de grava para viguetas prefabricadas	84
Tabla 13.	Medidas y cotas del vertedero de lavado y el de aliviadero	85
Tabla 14.	Equipos, materiales e insumos empleados en la evaluación	88
Tabla 15.	Insumos químicos aplicados en las pruebas de tratabilidad	88
Tabla 16.	Coagulantes químicos usados en la planta de tratamiento de agua potable	101
Tabla 17.	Gradientes y tiempos aplicados en las pruebas de tratabilidad	109
Tabla 18.	Tabla para los resultados de las pruebas de decantación	111
Tabla 19.	Diseño Box-Behnken para tres variables (Montgomery, 2011)	111
Tabla 20.	Factores y niveles para el diseño estadístico	113
Tabla 21.	Ecuaciones para el diseño del canal con cambio de pendiente	114
Tabla 22.	Ecuaciones para el diseño de la tubería de dosificación	115
Tabla 23.	Ecuaciones para el diseño de los floculadores	116
Tabla 24.	Ecuaciones para el diseño de los floculadores	117
Tabla 25.	Ecuaciones para el dimensionamiento de la tubería de distribución de agua en los decantadores	118
Tabla 26.	Dimensionamiento de la zona de sedimentación	120
Tabla 27.	Dimensionamiento de la tubería de recolección de agua decantada	121
Tabla 28.	Dimensionamiento de la zona de recolección lodos	121
Tabla 29.	Dimensionamiento de la zona de extracción de lodos	122
Tabla 30.	Cálculo de dimensionamiento de las baterías de filtros	124
Tabla 31.	Resultados de la estimación de la población futura de acuerdo a la tasa de crecimiento poblacional	129
Tabla 32.	Resultado de calidad de agua, enero de 2019	132
Tabla 33.	Resultados del monitoreo de turbidez enero y parte de febrero	136
Tabla 34.	Resultados de monitoreo de turbidez en las unidades de la PTAP en enero y parte de febrero	139
Tabla 35.	Resultados del monitoreo de color enero y parte de febrero	143
Tabla 36.	Resultados de monitoreo de color en las unidades de la PTAP	146
Tabla 37.	Resultados de monitoreo de pH en las unidades de la PTAP	151

Tabla 38.	Resultados de monitoreo de conductividad en la entrada y en la salida de la PTAP	153
Tabla 39.	Resultado de las dosis óptimas para cada muestra de agua en la PTAP	156
Tabla 40.	Tiempos y gradientes con los que trabaja la planta	159
Tabla 41.	Coagulantes químicos aplicados en las pruebas de tratabilidad ...	159
Tabla 42.	Caracterización de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad.....	160
Tabla 43.	Resultado de la prueba con sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5%	160
Tabla 44.	Resultados de la prueba de tratabilidad con sulfato de aluminio Tipo A en solución a una concentración de 2.5%.....	161
Tabla 45.	Resultados de la prueba con cloruro férrico al 2.5%	162
Tabla 46.	Resultados de la prueba de tratabilidad con Policloruro de aluminio PAC a una concentración de 2.5%.....	163
Tabla 47.	Características de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad.....	167
Tabla 48.	Resultados de la prueba de tratabilidad con sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5%	168
Tabla 49.	Resultados de la prueba con sulfato de aluminio Tipo A en solución a una concentración de 2.5%	169
Tabla 50.	Resultados de la prueba de tratabilidad con cloruro férrico al 2.5%	170
Tabla 51.	Resultados de la prueba de tratabilidad con Policloruro de aluminio PAC a una concentración de 2.5%.....	171
Tabla 52.	Gradientes y tiempos de floculación real de la PTAP Villa Rica....	175
Tabla 53.	Caracterización de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad.....	175
Tabla 54.	Insumo químico, concentración y dosis del coagulante	175
Tabla 55.	Resultados de la prueba de tratabilidad a diferentes niveles de pH.....	175
Tabla 56.	Características de la muestra cruda del agua	177
Tabla 57.	Insumos químicos, dosis y concentración aplicada en la prueba de tratabilidad para hallar dosis optima de polímero catiónico	177
Tabla 58.	Resultados de la dosis optima de polímero catiónico como ayudante de coagulación.....	178
Tabla 59.	Insumos químicos, dosis y concentración para determinar la dosis de coagulante con polímero catiónico.....	179
Tabla 60.	Resultados de la dosis optima de sulfato de aluminio granulado tipo A como ayudante de coagulación.....	179
Tabla 61.	Insumos químicos, dosis y concentración para determinar dosis de polímero catiónico	181
Tabla 62.	Resultado de la dosis optima de polímero catiónico como ayudante de floculación.....	181
Tabla 63.	Insumos químicos, dosis y concentración para determinar dosis del coagulante con polímero catiónico	182
Tabla 64.	Resultados de la dosis optima de coagulante (sulfato de aluminio tipo A) con polímero catiónico	183
Tabla 65.	Insumo químico, concentración y dosis aplicada en la prueba de tratabilidad.....	184
Tabla 66.	Características del agua cruda con turbidez baja.....	185

Tabla 67.	Resultados de la prueba con gradiente de 20 S ⁻¹ .	185
Tabla 68.	Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 30 S ⁻¹ .	186
Tabla 69.	Resultados de la prueba con gradiente de 40 S ⁻¹ .	187
Tabla 70.	Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 50 S ⁻¹ .	188
Tabla 71.	Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 60 S ⁻¹ .	188
Tabla 72.	Resultados de turbidez final a diferentes tiempos y gradientes.	189
Tabla 73.	Resultados de color final a diferentes tiempos y gradientes.	190
Tabla 74.	Insumo químico, concentración y dosis aplicada	192
Tabla 75.	Características del agua cruda con turbidez alta.	193
Tabla 76.	Resultado de la prueba de tratabilidad con gradiente de 20 S ⁻¹ .	193
Tabla 77.	Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 30 S ⁻¹ .	194
Tabla 78.	Resultado de la prueba de tratabilidad con gradiente de 40 S ⁻¹ .	195
Tabla 79.	Prueba con gradiente de 50 S ⁻¹ .	195
Tabla 80.	Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 60 S ⁻¹ .	196
Tabla 81.	Resultados de turbidez final a diferentes tiempos y gradientes.	197
Tabla 82.	Resultados de color final a diferentes tiempos y gradientes.	197
Tabla 83.	Gradientes aplicados para la prueba de decantación	200
Tabla 84.	Resultados de la turbidez final alcanzada a diferentes tiempos	201
Tabla 85.	Proporción de turbiedad que no se removió en el proceso	202
Tabla 86.	Resultados de la tasa de decantación óptima	202
Tabla 87.	Resumen de los resultados de las pruebas de tratabilidad	204
Tabla 88.	Combinaciones de factores y niveles para el diseño estadístico.	206
Tabla 89.	Resultado de la combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez baja.	207
Tabla 90.	Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de reducción de turbidez.	207
Tabla 91.	Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez baja.	211
Tabla 92.	Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de remoción de turbidez.	211
Tabla 93.	Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez alta.	215
Tabla 94.	Análisis de varianza ANOVA	216
Tabla 95.	Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez alta.	219
Tabla 96.	Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de remoción de color.	220
Tabla 97.	Resultado de los cálculos del dimensionamiento del mezclador con cambio de pendiente	229
Tabla 98.	Constantes de verificación del diseño	230
Tabla 99.	Resultados del diseño del tubo difusor de sulfato de aluminio	231
Tabla 100.	Parámetros de operación de los floculadores verificados en campo.	232
Tabla 101.	Resultado de las correcciones propuestas para la unidad de floculadores	234
Tabla 102.	Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 1 del floculador	236
Tabla 103.	Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 2 del floculador	237

Tabla 104.	Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 3 del floculador	238
Tabla 105.	Tubería de distribución de agua floculada.....	241
Tabla 106.	Resultados del dimensionamiento del canal lateral de agua...	244
Tabla 107.	Resultados del caudal de paso para cada compuerta del decantador	246
Tabla 108.	Comparación entre las tuberías de distribución de agua floculada existente y la que se está proponiendo en el replanteo.	247
Tabla 109.	Resultados del dimensionamiento de la tubería de distribución de agua floculada en el decantador.	248
Tabla 110.	Resultados de dimensionamiento de la zona de sedimentación de agua del decantador laminar	250
Tabla 111.	Comparación de los criterios de diseño considerados en el diseño existente y el replanteo de la unidad.....	252
Tabla 112.	Resultados del dimensionamiento del decantador laminar y zona de recolección de agua del decantador	252
Tabla 113.	Resultados del dimensionamiento de la zona de extracción de lodo en el decantador laminar.	254
Tabla 114.	Dimensionamiento vertical del decantador.....	254
Tabla 115.	Resultados del dimensionamiento de la zona de extracción de lodo del decantador laminar	254
Tabla 116.	Resultados del dimensionamiento de las baterías de filtro	258
Tabla 117.	Distribución del medio filtrante en subcapas y cálculo de la expansión	260
Tabla 118.	Pérdida de carga en el medio filtrante.....	261

Índice de Figuras

Figura 1.	Perfil de temperaturas de un embalse.....	34
Figura 2.	Solubilidad de sales a diferentes temperaturas	35
Figura 3.	Coagulación por absorción.....	43
Figura 4.	Mecanismo de la coagulación por barrido.....	44
Figura 5.	Fases de la desestabilización	47
Figura 6.	Formación de flóculos por adsorción.....	48
Figura 7.	Floculación por efecto de barrido	49
Figura 8.	Formación de puentes por un floculante	52
Figura 9.	Canal con cambio de pendiente y vertedero rectangular	57
Figura 10.	Floculador de pantallas de flujo horizontal	58
Figura 11.	Reducción de gradiente de velocidad a lo largo del tramo de los floculadores	58
Figura 12.	Floculador horizontal	59
Figura 13.	Floculadores de flujo vertical	59
Figura 14.	Decantador de placas de flujo ascendente.....	61
Figura 15.	Decantador de placas de flujo ascendente.....	61
Figura 16.	Decantador de placas de flujo ascendente.....	61
Figura 17.	Componentes de la batería de filtros de tasa declinante.....	63
Figura 18.	Batería de filtros de tasa declinante.	64
Figura 19.	Vista de corte transversal de los filtros.....	64
Figura 20.	Mapa de ubicación	71
Figura 21.	Mapa climático nacional y zona de estudio	73
Figura 22.	Captación de agua del río Ñagazú	74
Figura 23.	Válvulas de compuerta y canal de conducción del afluente	74
Figura 24.	Operador de la planta en el almacén	75
Figura 25.	Dosificación por gravedad	77
Figura 26.	Corte de la unidad de mezcla rápida	78
Figura 27.	Floculadores con agua turbia	80
Figura 28.	Vertedero de lavado de los filtros	85
Figura 29.	Insumos químicos empleados en las pruebas de laboratorio.....	89
Figura 30.	Equipo de prueba de jarras empleado en las pruebas de tratabilidad.....	90
Figura 31.	Flujograma del proyecto.....	93
Figura 32.	Turbidímetro empleado en las pruebas de tratabilidad	97
Figura 33.	Colorímetro empleado en las pruebas de tratabilidad	98
Figura 34.	pH metro empleado en las pruebas de tratabilidad	99
Figura 35.	Medición de los parámetros en laboratorio.....	100
Figura 36.	Monitoreo de alcalinidad.....	101
Figura 37.	Equipo de prueba de jarras configurado para la prueba	102
Figura 38.	Prueba de jarras para determinar el coagulante y dosis óptima... ..	104
Figura 39.	Pruebas de tratabilidad con diferentes niveles de pH	106
Figura 40.	Preparación del polímero y tratamiento.....	109
Figura 41.	Flocs formados y extracción de la muestra de agua	110
Figura 42.	Diseño de Box-Behnken para tres factores.....	112
Figura 43.	Resultado de la variación de temperatura mensual 2018-2019	127
Figura 44.	Resultado de la precipitación mensual 2018-2019.....	128
Figura 45.	Resultados de la estimación de población futura	129

Figura 46. Resultados de la proyección de población en los próximos 20 años y demanda de caudal requerido.....	131
Figura 47. Resultados del registro del ingreso de caudal en la PTAP	133
Figura 48. Resultados del volumen tratado de agua por día y por mes	134
Figura 49. Resultados de la frecuencia acumulada de turbidez de agua cruda 2016 - 2017	135
Figura 50. Resultados de la turbidez mensual promedio 2017 – 2018.....	136
Figura 51. Resultados del monitoreo de turbidez – enero y parte de febrero 2019	137
Figura 52. Resultados de la variación de la turbidez en los decantadores en enero y parte de febrero	140
Figura 53. Comparación visual de los niveles de turbidez en los decantadores	141
Figura 54. Comparación visual de la turbidez en los decantadores	141
Figura 55. Resultados de la variación del nivel de turbidez entrada-filtrada en el mes de enero y parte de febrero	142
Figura 56. Resultados del monitoreo de color – enero y parte de febrero 2019	144
Figura 57. Resultado de la variación del nivel de color en los decantadores .	147
Figura 58. Resultados de la variación del nivel de color entrada-salida de filtros.....	148
Figura 59. Monitoreo de temperatura del agua – enero 2019	149
Figura 60. Resultados de la variación del nivel de pH en los decantadores..	152
Figura 61. Variación del nivel de pH entrada-filtrada.....	153
Figura 62. Resultados de la variación del nivel de conductividad entrada-filtrada	154
Figura 63. Resultados del monitoreo de alcalinidad en el ingreso de la planta	156
Figura 64. Resultados de las dosis óptimas para cada muestra de agua en la PTAP	158
Figura 65. Curva de coagulante óptimo y turbidez final.....	165
Figura 66. Curva de coagulante óptimo y color real final.....	166
Figura 67. Curva de coagulante óptimo y turbidez final.....	172
Figura 68. Curva de coagulante óptimo y color real final.....	174
Figura 69. Resultados de Turbidez final a distintos niveles de pH	176
Figura 70. Resultados de la dosis óptima del polímero catiónico como ayudante de coagulación.....	178
Figura 71. Resultados de la dosis óptima de sulfato de aluminio tipo A aplicado con polímero catiónico como ayudante de coagulación..	180
Figura 72. Resultado de la dosis óptima del polímero catiónico como ayudante de floculación.....	182
Figura 73. Dosis óptima de sulfato de aluminio tipo A.....	183
Figura 74. Curva turbidez final vs tiempo de floculación	191
Figura 75. Curva color real vs gradiente de floculación.....	192
Figura 76. Curva turbidez final vs tipo de floculación	199
Figura 77. Curva color real vs tiempo de floculación.....	200
Figura 78. Curva de decantación	202
Figura 79. Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de turbidez	209
Figura 80. Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la remoción de turbidez.	210
Figura 81. Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de color....	213

Figura 82. Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la remoción de color.....	214
Figura 83. Diagrama de Pareto para la reducción de turbidez.....	217
Figura 84. Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad la remoción de turbidez.....	218
Figura 85. Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de turbidez.....	221
Figura 86. Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la remoción de color.....	222
Figura 87. Vista en corte de la unidad de mezcla rápida.....	223
Figura 88. El punto de aplicación se ubica antes de la turbulencia máxima..	225
Figura 89. Tubería de dosificación	225
Figura 90. Resalto hidráulico adicional.....	226
Figura 91. Turbulencia al final del canal de mezcla rápida e ingreso al floculador.....	227
Figura 92. Dosificador de coagulante	228
Figura 93. Vista de corte del replanteo del canal de mezcla rápida	232
Figura 94. Estado actual de la unidad de floculadores	233
Figura 95. Esquinas en las pantallas que generan turbulencia en el recorrido del agua.....	233
Figura 96. Vista de planta de replanteo de los tres tramos de floculación.....	239
Figura 97. Estado de los decantadores con turbidez elevada	240
Figura 98. Vista de corte del canal de recolección de agua floculada	241
Figura 99. Decantador de flujo laminar.....	243
Figura 100. Vista de corte de los decantadores	244
Figura 101. Vista de corte del canal de repartición de agua a los decantadores.....	247
Figura 102. Vista de corte del replanteo de la zona de recolección de lodos.....	256
Figura 103. Retrolavado de filtros	257
Figura 104. Vista de corte del replanteo de los filtros.....	262
Figura 105. Tablero eléctrico en la sala de dosificación.....	263
Figura 106. Aplicación de cloro por inyección directa	264

Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia	278
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables.....	279
Anexo 3. Formato para monitoreo de calidad de agua en la planta	280
Anexo 4. Datos meteorológicos – Estación meteorológica Pasco.....	281
Anexo 5. Constancia de aprobación de la EPS Selva Central para realizar pruebas de laboratorio en la PTAP de Villa Rica.....	282
Anexo 6. Registro de monitoreo de la calidad de agua en la planta.....	283
Anexo 7. Coeficientes de regresión del análisis estadístico Box-behnken ...	290
Anexo 8. Plano general del replanteo de la planta de tratamiento – Vista de planta.....	292

SÍMBOLOS USADOS

SST: Sólidos Suspendidos Totales

pH: Potencial de Hidrógeno

LMP: Límites Máximos Permisibles

IWA: International Water Association

MINAM: Ministerio del Ambiente

MVCS: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

SUNASS: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento

OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

ANA: Autoridad Nacional del Agua

WHO: World Health Organization

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad de agua de la planta de tratamiento de agua de Villa Rica-Oxapampa, en el desarrollo de la investigación se realizaron monitoreos de la calidad y pruebas de tratabilidad con dos muestras de agua, una con 453 UNT y muestra otra con 23 UNT aplicando cuatro coagulantes a una concentración de de 2.5 %, las dosis de coagulante aplicadas para las muestras entre 10 y 60 mg/L, también se realizaron pruebas modificando el pH, pruebas con polímero catiónico al 0.023% como ayudante de coagulación y floculación con dosis de 0.05 - 0.5 mg/L, pruebas para determinar parámetros de diseño, aplicando tiempos de floculación de 10 a 35 minutos y gradientes de velocidad de 20 - 60 S^{-1} , pruebas de decantación, y cálculos de las unidades con los parámetros de diseños obtenidos en laboratorio, para evidenciar los resultados se aplicó el diseño estadístico de Box-Behnken considerando 3 factores con 3 niveles los cuales son los siguientes: Tiempo: 25, 30 y 35 minutos, Gradiente: 30, 40 y 50 S^{-1} para ambas muestras, las dosis aplicadas para la muestra uno es de 50, 55 y 60 mg/L, para la muestra dos se consideró dosis de 25, 30 y 35 mg /L. Se registraron los niveles de color y turbidez y con las pruebas de tratabilidad se determinó que el coagulante óptimo para este tipo de aguas es el sulfato de aluminio granulado tipo A con una dosis de 30 mg/L para la muestra uno y 55 mg/L para la muestra dos, la gradiente de velocidad óptima es de 40 S^{-1} y el tiempo de floculación óptimo es de 30 minutos; con esos parámetros óptimos la muestra uno (turbidez y color bajos) obtuvo 2 UNT y color 6 UCV y la muestra dos (turbidez y color altos) obtuvo 3 UNT y color 7 UCV.

Palabras clave: Calidad, color, turbidez, tratabilidad, procesos unitarios.

SUMMARY

The objective of this research was to evaluate the water's quality in the treatment plant of Villa Rica-Oxapampa, during the research, quality monitoring and treatability tests were carried out with two water samples, one with 453 UNT and another with 23 UNT four coagulants at a concentration of 2.5% were applied, the coagulant doses applied for the samples were between 10 and 60 mg / L, tests were also performed modifying the pH, tests with 0.023% cationic polymer as an assistant of coagulation and flocculation with doses of 0.05 - 0.5 mg / L, tests to determine design parameters, applying flocculation times of 10 to 35 minutes and speed gradients of 20 - 60 S⁻¹, decantation tests, and calculations of units with the parameters of designs obtained in the laboratory, to show the results the statistical design of Box-Behnken was applied considering 3 factors with 3 levels which are the Following: Time: 25, 30 and 35 minutes, Gradient: 30, 40 and 50 S⁻¹ for both samples, the doses applied for sample one is 50, 55 and 60 mg / L, for sample two doses were considered of 25, 30 and 35 mg / L. Color and turbidity levels were recorded and with the treatability tests it was determined that the optimum coagulant for this type of water is granulated aluminum sulfate type A with a dose of 30 mg / L for sample one and 55 mg / L for sample two, the optimum velocity gradient is 40 S⁻¹ and the optimal flocculation time is 30 minutes; With these optimal parameters, sample one (low turbidity and color) obtained 2 UNT and color 6 UCV and sample two (high turbidity and color) obtained 3 UNT and color 7 UCV.

Keywords: Quality, color, turbidity, treatability, unit processes.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

1.1.1. *Planteamiento del problema*

A nivel mundial, la calidad del agua potable es una cuestión que genera gran preocupación según lo señalado por la ONU en el 2010, se conoce que la calidad de agua captada para tratamiento es afectada por partículas en suspensión, organismos vivos, microorganismos, bacterias, virus, huevos de parásitos, plantas, materias orgánicas y gases que el agua arrastra en su paso por la naturaleza. Estas partículas tienen un efecto positivo sobre la proliferación de microorganismos causando un incremento en los niveles de color y turbidez, el cual es uno de los principales problemas en el tratamiento de agua (Chulluncuy, 2011; Cogollo, 2011; Pacheco, 2005; SUNASS, 2004a).

En América Latina la cobertura de agua potable es 84.5% y en el grupo de países andinos como Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela es de 82%, sin embargo a pesar de que la cobertura del servicio es relativamente amplia, se observan problemas de calidad en los efluentes de las plantas de tratamiento de agua potable en la mayoría de países que conforman América Latina y el Caribe debido a deficiencias en la operación y mantenimiento de servicios (Fernández & Du Mortier, 2005). En el año 2015, la cobertura del servicio de agua potable fue de 82% según informes del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado (SEDAPAL).

De Vargas (2004) menciona que en los embalses y ríos de la selva, generalmente el agua es ácida, blanda, altamente coloreada y con altos niveles de turbidez por la presencia de partículas y materia orgánica, que dificultan el proceso

de coagulación y generan excesivas cantidades de materia particulada o coagulante residual que llega al consumidor final a través del sistema de distribución; hay que mencionar también que la turbidez y color elevados en el agua son una de las principales causas de queja entre los usuarios, La cuenca del Ñagazú – Villa Rica, provincia de Oxapampa – Pasco por estar ubicada en la selva central, naturalmente no es ajena a este problema, el agua cruda que ingresó a la planta de tratamiento de agua potable en los años 2017 y 2018 presentó una turbidez menor a 20 UNT el 42% del tiempo, el 66% del tiempo presentó turbidez menor a 50 UNT, el 83% del tiempo presentó turbidez menor a 100 UNT y se registraron valores máximos esporádicos mayores a 2000 UNT de acuerdo a los resultados acumulados con los que cuenta la planta de tratamiento (CESEL Ingenieros, 2012; WHO, 2012).

Es importante añadir que otros factores que influyen sobre la calidad del agua tratada por la planta son los siguientes:

- Inadecuada dosificación en planta: Da lugar a la producción de un floc pequeño y ligero, que no decanta con facilidad, como consecuencia el agua que ingresa a los filtros los colmata y es necesario lavarlos frecuentemente. Por otro lado, cuando el floc es muy frágil se desintegra dando lugar a pequeñas partículas que atraviesan el filtro y alteran la calidad de agua (Andía, 2000).
- Inadecuado diseño: Dueñas (2016) expresa que el inadecuado diseño y construcción de las unidades de tratamiento (sistema de dosificación, canales con cambio de pendiente, floculadores, decantadores y filtros) influye negativamente sobre la calidad del producto.

- Mantenimiento inadecuado: Muchas de las plantas de tratamiento de agua potable en el Perú se encuentran con equipos averiados debido a la mala operación y a la falta de recursos para su mantenimiento (De Vargas, 2004e).

La planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica construida en el 2004 y rehabilitada en el año 2016, no garantiza agua de buena calidad a la población, según los monitoreos realizados se determinó que la calidad de agua en el efluente de la planta cumple con la mayoría de los límites máximos permisibles a excepción de los parámetros de color y turbidez, en efecto la población ha presentado quejas constantes por el color y turbidez en el agua recibida, especialmente en los meses de enero a marzo que corresponden a la época lluviosa en la zona.

1.1.2. Formulación de problema

1.1.1.1. Problema general

¿La calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica cumple con el reglamento de calidad de agua para consumo humano?

1.1.1.2. Problemas específicos

- ¿La turbidez del agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua?
- ¿El color de agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua?
- ¿Los parámetros de dosificación de insumos químicos como: ¿Tipos, dosis y concentraciones de coagulantes son óptimos para la remoción de color y turbidez del agua?

- ¿Los parámetros de diseño como: Tiempos de floculación y gradientes de velocidad son óptimos para permitir la remoción de color y turbidez?
- ¿El diseño de las unidades de la planta es adecuado para favorecer la reducción de color y turbidez del agua?

1.2. Justificación del problema

El agua potable desempeña un papel fundamental en el desarrollo y bienestar de nuestra sociedad. De acuerdo a la ley general de servicios de saneamiento, D.S. 023-2005-VIVIENDA y sus modificatorias, las municipalidades provinciales y regionales son responsables de una adecuada gestión de los servicios de saneamiento y otorgan el derecho de explotación a las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS). Las empresas prestadoras de servicio (EPS) tienen la responsabilidad de brindar a la población la cantidad suficiente de agua a un costo razonable que cumpla con los estándares de calidad de agua establecidos en el Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano D.S. 031-2010-SA sin importar el tipo de fuente de abastecimiento. En el Perú existen 50 EPS que a través de sus plantas de tratamiento de agua potable administran alrededor de 3.7 millones de conexiones de agua potable; las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) necesitan contar con una serie de procesos unitarios seleccionados convenientemente y diseñados con el fin de remover total y parcialmente los contaminantes del agua y durante la operación es necesario establecer los puntos críticos que afectan a la calidad del producto como: Los rangos de turbidez del agua cruda, deficiencia de las unidades de tratamiento y la correcta dosificación para cada tipo de agua (SUNASS, 2016).

La dosificación del insumo químico (coagulante) es clave para el tratamiento efectivo y la reducción de impurezas que representan el color del agua y puede ser un gasto elevado si dicho procedimiento no se realiza adecuadamente. La cobertura de agua potable en Villa Rica es del 96.6%, lo cual involucra una población aproximada de 19 791 personas que consumen agua con deficiente calidad, esto se conoce por las quejas registradas por los usuarios que afirman estar recibiendo agua con alto contenido de color y turbidez.

De acuerdo a lo aclarado anteriormente, es conveniente la realización del proyecto que en primer lugar logrará determinar en qué aspectos se presentan las deficiencias en la planta de tratamiento, en segundo lugar se establecerán las dosis y concentraciones óptimas para remover el color y turbidez y garantizar la calidad del agua para la población de Villa Rica así como los gradientes y tiempos óptimos de retención con los cuales finalmente se generará una alternativa de diseño de las unidades de tratamiento (Cogollo, 2011; EPS Selva Central S.A., 2014).

1.3. Presuposición filosófica

El agua es el elemento más importante para el ser humano por sus múltiples beneficios, los autores de la presente investigación usan como base el principio bíblico de que el agua le fue dado al hombre como una de las más grandes bendiciones como menciona el relato de Génesis 21:19 y Hebreos 6:7 y por lo tanto es nuestro deber administrarla con responsabilidad. No sólo nos fue otorgado para calmar la sed sino para suplir la necesidad del organismo y como ayuda para resistir la enfermedad ya que es considerado como un remedio natural por múltiples usos para el ser humano. El agua pura y blanda es vital para resistir la enfermedad, y

miles de personas que han muerto podrían haberlo evitado si consumían agua pura, la filosofía de los autores del presente trabajo también coincide con la idea del planteada por el director general de la OMS, Adhanom (2018), que señala que el acceso al agua potable y saneamiento no debe ser un privilegio sólo de aquellos que quienes gozan de una buena economía, además el derecho al agua limpia, saludable y asequibles es un derecho reconocido por las normas nacionales e internacionales.

Por otro lado, el principio bíblico mencionado en Proverbios 3:27 nos invita a hacer el bien cuando esté en nuestras posibilidades hacerlo, adicionalmente, el código de ética del ingeniero expone que una de las obligaciones de los profesionales es contribuir al bienestar humano, por lo tanto, los investigadores deben aportar con espíritu de servicio con sus conocimientos y ser cuidadosos en las pruebas y evaluaciones a realizar para que la población reciba un producto de calidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Evaluar la calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica - Oxapampa.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Determinar la turbidez del agua en el afluente y efluente de la planta de tratamiento.
- Determinar el color del agua en el afluente y efluente de la planta de tratamiento.

- Realizar pruebas de tratabilidad para determinar los coagulantes y dosis óptimas para la remoción de turbidez y color.
- Determinar los parámetros de diseño: Tiempo de floculación y gradiente de velocidad óptimos para permitir la remoción de color y turbidez.
- Proponer un diseño de planta adecuado que permita reducir el color y la turbidez.

CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Redondo & López (2016) en su investigación “Evaluación de la calidad de agua en la planta potabilizadora El Dorado-Bogotá” tuvieron el objetivo de “Evaluar la calidad del agua en la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado” en Colombia (p. 17). La metodología tuvo cuatro etapas: Recolección de datos, determinación de causas y efectos para establecer los factores que afectan la calidad del agua y evaluación estadística de la información. Dentro de sus resultados los parámetros con mayor variabilidad fueron: aluminio residual (0,07 – 0,06 mg/L), hierro total (0,03 – 0,05 mg/L), color (1,76 – 1,29 UPC) y turbiedad (0,27 – 0,14 UNT). Con dichos resultados comprobaron que la remoción está influenciada directamente por las características del agua cruda captada, los procesos realizados en la planta, y la dosificación de reactivos.

Camacho (2014) en la investigación “Control y evaluación de la PTAP de Caluma-Bolívar” realizada en Ecuador tuvo como objetivo evaluar la eficiencia en una la planta de potabilización de agua para consumo humano de la provincia de Bolívar. Como primera etapa de trabajo consideraron el análisis del agua a tratarse y tratada, también realizaron cálculos de las dosis de los productos químicos que utilizan en la planta potabilizadora, también implementaron registros y documentos técnicos para el control diario de cada uno de los procesos que se realizan para la potabilización del agua. Los resultados revelaron que las condiciones de la planta de tratamiento y la dosificación de Sulfato de Aluminio e Hipoclorito de calcio son factores que influyen significativamente sobre la calidad de agua tratada.

Díaz (2017) en su investigación “Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tena en el departamento de Cundinamarca” tuvo como objetivo evaluar técnicamente la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del municipio de Tena - Cundinamarca para su posterior optimización. A partir del análisis de la información e inspecciones realizadas en la PTAP, identificaron las necesidades y prioridades de la planta potabilizadora. A través de su investigación determinaron aspectos técnico - operativos de la planta de tratamiento de agua potable, también se desarrollaron tres alternativas de optimización que consisten en el rediseño del floculador, la instalación de un macromedidor y la modificación del difusor de cloro; con estas tres alternativas mejorara la calidad de agua y se aprovechara mejor el recurso.

Catalina & Velásquez (2015) en su tesis titulada “Evaluación técnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Chocontá, Cundinamarca” tuvo como objetivo la evaluación técnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable ubicada en el municipio de Chocontá, Cundinamarca, en el desarrollo de su investigación consideraron los criterios de diseño y parámetros de operación de la planta de Tratamiento de Agua Potable con lo instaurado en el Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, establecieron consideraciones de mejoramiento técnico y operativo para la planta en base a los parámetros establecidos en la normatividad vigente del sector de agua potable, que fueron comparados con el diagnóstico desarrollado, luego analizados y con la información obtenida se determinaron las falencias de las estructuras y procesos, y así se establecieron consideraciones de mejoramiento para optimizar el desarrollo de la potabilización del agua que es suministrada a la población.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Dueñas (2016) en su investigación “Evaluación y Mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable del centro poblado de Yauri, distrito de Yauri, Provincia de Espinar, Cusco.” tuvo por objetivo evaluar la operatividad y eficiencia de la planta de tratamiento de agua potable de tecnología convencional existente, y plantear la alternativa más adecuada para su mejoramiento; asegurando la eficiencia de su funcionamiento, operación y mantenimiento, de tal manera que el agua producida sea suficiente en cantidad, y cumpla con las normas de calidad del agua de consumo. La evaluación de la PTAP permitió determinar que los procesos unitarios como la dosificación, mezcla rápida, floculación, decantación y filtración; resultaban poco eficientes, debido principalmente al mayor caudal que están tratando y ocasionando que en épocas de alta turbiedad la planta se paralice, trayendo como consecuencia que el agua producida no cumpla con los límites permisibles establecidos por las normas de calidad. En respuesta a esta situación, se plantean propuestas de mejoramiento para cada proceso unitario como se detalla a continuación:

- Sistema de dosificación: Implementación de un sistema de bombeo automático de agua filtrada para la preparación de soluciones, instalación de bombas dosificadoras para regular el caudal de solución, colocación de difusores, y aumento de la capacidad de los tanques de solución, en concordancia a los parámetros óptimos de dosificación obtenidos en laboratorio y el caudal de operación actual.
- Mezcla rápida: Mejoramiento de las condiciones hidráulicas de salida de la unidad, logrando un resalto óptimo con un tiempo de mezcla de 1.16 s y un gradiente de velocidad 914 S^{-1} .
- Floculación: Aumento del tiempo de retención de 14.6 min a 18 min, aproximándolo al tiempo óptimo. Las pantallas del floculador se han cambiado por nuevas

unidades de fibra de vidrio, distribuidas de acuerdo a los gradientes óptimos obtenidos en laboratorio.

- Decantación: Incremento de la tasa de decantación aparente de 29 m³ /m² - día a 100 m³ /m² -día, mediante la instalación de placas paralelas de vinilona, y se ha mejorado la distribución de caudales, de manera que el efluente producido sea menor a 2 UNT.
- Filtración: Incremento de la tasa de filtración de 120 m³ /m² -día a 270 m³ /m² - día, mediante el cambio del medio filtrante a un lecho doble de arena y antracita de 0.65m de espesor, de manera que el efluente producido por los filtros sea menor a 0.1 UNT.

2.1.3. Antecedentes locales

A nivel local no se cuentan con investigaciones en la línea de aguas, sin embargo, en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica se realizaron evaluaciones por la EPS Selva Central, dichas evaluaciones a nivel planta y laboratorio estuvo a cargo de CESEL Ingenieros. La evaluación está basada en la información recogida en campo, en los resultados de laboratorio y la data de calidad entregada por la EPS Selva Central.

2.2. Marco legal

La carta magna de nuestro país ha establecido que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de su vida, la ley general del ambiente también lo menciona añadiendo que tenemos derecho a vivir en un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida, en adición a esto, el Ministerio de Salud (2011) a través del Reglamento de Calidad de Agua para

Consumo Humano dispuso bases sobre la calidad del agua para consumo para garantizar su inocuidad y prevenir riesgos sanitarios así como proteger a la población.

2.2.1. Ley general de servicios de saneamiento Ley N° 26338.

Esta ley establece las normas que rigen la prestación de los servicios de saneamiento en nuestro país, en el artículo dos menciona que “Para los efectos de la presente Ley, la prestación de los Servicios de Saneamiento comprende la prestación regular de: servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial y disposición sanitaria de excretas, tanto en el ámbito urbano como en el rural”.

2.2.2. D.S. N° 023-2005-Vivienda. Texto Único Ordenado del Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento

En su primer artículo menciona que tiene la finalidad de regular la aplicación de la Ley General de Servicios de Saneamiento y comprende las disposiciones relativas a:

- Las condiciones de la prestación regular de los servicios de saneamiento.
- Las funciones, atribuciones, responsabilidades, derechos y obligaciones de las entidades vinculadas a la prestación de servicios de saneamiento, así como los derechos y obligaciones de los usuarios.
- Los regímenes empresariales, la regulación de tarifas, la participación del sector privado y el uso de bienes públicos y de terceros para la prestación de los servicios de saneamiento.

2.2.3. Ley de modernización de los servicios de saneamiento

Establece el marco para el proceso de modernización de los servicios de saneamiento, cuyo objeto es establecer medidas orientadas al incremento de la

cobertura y al aseguramiento de la calidad y la sostenibilidad de los servicios de saneamiento a nivel nacional, promoviendo el desarrollo, la protección ambiental y la inclusión social.

2.2.4. *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales R.J. N° 010-2016-ANA*

Tiene como finalidad estandarizar los criterios y procedimientos técnicos para desarrollar el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos, continentales y marino-costeros. Y es obligatorio a nivel nacional para el monitoreo de la calidad ambiental del agua de los cuerpos de agua.

2.2.5. *Reglamento nacional de edificaciones: Norma OS. 020 Plantas de tratamiento de agua para consumo humano*

El objetivo de la norma es el de establecer criterios básicos de diseño para el desarrollo de proyectos de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.

2.2.6. *Reglamento de calidad de agua para consumo humano*

El reglamento establece las disposiciones generales relacionados a la gestión de la calidad del agua para consumo humano, con el fin de garantizar su inocuidad, prevenir los factores de riesgos sanitarios, así como proteger y promover la salud y bienestar de la población.

Para la presente investigación se tomó en cuenta los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Salud en el D.S. 031-2010-SA. A continuación, en la Tabla 1, se presentan los valores de calidad físico-química para calidad de agua potable, recomendados por el Ministerio de Salud y en la Tabla 2 los límites máximos permisibles de parámetros microbiológicos y parasitológicos.

Tabla 1.*Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica.*

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Olor	----	Aceptable
Sabor	----	Aceptable
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbidez	UNT	5
pH	Valor de pH	6.5 a 8.5
Conductividad	µmho/cm	1 500
Sólidos totales disueltos	mg/L	1 000
Cloruros	mg Cl-/L	250
Sulfatos	mgSO ₄ -/L	250
Dureza total	mg CaCo ₃ /L	500
Amoniaco	mg N/L	1.5
Hierro	mg Fe/L	0.3
Manganeso	mg Mn/L	0.4
Aluminio	mg Al/L	0.2
Cobre	mg Cu/L	2
Zinc	mg Zn/L	3
Sodio	mg Na/L	200

Tabla 2.*Límites máximos permisibles de parámetros microbiológicos y parasitológicos (D.S. 031-2010-SA)*

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Bacterias coliformes totales	UFC/100 mL a 35°C	
Escherichia coli		
Bacterias coliformes termotolerantes o fecales	UFC/100 mL a 44.5°C	0
Bacterias Heterotróficas	UFC/100 mL a 35°C	500
Huevos y larvas de helmintos, quistes y ooquistes de protozoarios patógenos	N° org/L	
Virus	UFC/mL	
Organismos de vida libre, como algas, protozoarios, copépodos, rotíferos y nemátodos en todos sus estadios evolutivos	N° org/L	0

2.3. Marco teórico

El agua es un elemento que permite el desarrollo de la vida y es usada por el hombre para múltiples actividades debido a sus tan variadas propiedades, en estado natural puede contener compuestos disueltos que provienen de la erosión de suelos, por ello la presencia de materias en suspensión, arcilla, limos, coloides orgánicos,

plancton y organismos microscópicos (Marín, 2018). La clasificación de los contaminantes presentes en el agua se presenta en la Tabla 3 (Chulluncuy, 2011).

Tabla 3.

Clasificación de los contaminantes presentes en el agua

Físicos	Químicos	Gaseosos	Biológicos
Color	Materia orgánica	Anhídrido carbónico	Bacterias
Olor y sabor	Acidez/alcalinidad	Metano	Hongos
Grasas y aceites	pH	Ácido sulfhídrico	Protozoos
Espumas	Nitrógeno		Algas
Radiactividad	Fósforo		Animales
Sólidos disueltos	Salinidad		Plantas
Sólidos en suspensión	Metales pesados		Virus
	Detergentes		
	Compuestos tóxicos		
	Pesticidas		

Fuente: Fundación Universitaria Iberoamericana en Chulluncuy (2011)

2.3.1. Características físicas

2.3.1.1. Turbidez. Es la principal característica física del agua que afecta la calidad estética del agua pudiendo ocasionar rechazo por parte del consumidor, es un fenómeno óptico en el que, al pasar un haz de luz sobre las partículas presentes en el agua, los fotones no se transmiten en línea recta si no que se dispersan o se absorben, cabe aclarar que no siempre la materia en suspensión determina mayor o menor turbidez ya que existen otros factores como la forma, tamaño e índice de refracción de las partículas, ya que partículas de carbono presentes en el agua son ópticamente negras y absorben significativamente la luz e incrementan la turbidez. Continuando con la idea, la turbidez expresa la cantidad y aproximación entre materias coloidales como arcilla u otras materias inorgánicas y organismos microscópicos que pueden ser indicio de contaminación, por este motivo es uno de

los parámetros junto con el cloro residual, pH y coliformes que son obligatorios para el control de la calidad de agua potable (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation, 2001; Gamarra & Zapata, 1995; SUNASS, 2004b).

Las partículas minerales son las que conforman la mayor parte de material en suspensión presente en las aguas y proceden de la erosión de suelos y rocas y por lo general estar recubiertas de restos orgánicos. Marín (2010) afirma que estas partículas en suspensión (arcilla, limos, coloides orgánicos, plancton y microorganismos) pueden tener dimensiones de 10 nm a 0.1 mm y pertenecer a minerales, partículas orgánicas húmicas (provenientes de la descomposición o agregación de restos vegetales) y partículas filamentosas (restos de amiantos o silicatos) (Marín, 2018)

La American Water Works Association (2017) añade que está demostrado que la reducción de turbidez está asociada con la disminución del riesgo de microorganismos patógenos como *Cryptosporidium*, *Giardia* y *Salmonella*, asimismo, las partículas causantes de la turbidez protegen a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante disminuyendo su eficiencia, motivo por el cual la OMS recomienda que nunca debe superarse las cinco UNT, y para una mayor eficiencia de desinfección se debe mantener un valor promedio de una UNT.

Finalmente, la turbidez es un parámetro crítico en el monitoreo y control y el proceso que más influye en los costos de producción porque demanda coagulante, acondicionadores de pH y ayudantes de coagulación (Marcó, Azario, Metzler, & García, 2004; Organización Panamericana de la Salud, 2004)

2.3.1.2. **Color.** Es el segundo parámetro físico más importante, se puede mostrar de manera independiente o ligado a la turbidez, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (2006) se puede decir que el color natural del agua superficial se debe a sustancias coloreadas existentes en suspensión o disueltas en ella y puede provenir de:

- Materia orgánica de descomposición de vegetales.
- Presencia de sales solubles o iones metálicos como Fe y Mn (aguas subterráneas y superficiales poco oxigenadas).
- Humus y turbas
- Residuos industriales (de acuerdo a la actividad que se desarrolla).

Marín (2003) señala que las coloraciones rojizas observadas en aguas de bebida pueden ser efecto de acumulaciones de hierro, y las de color negro de manganeso divalentes que se oxidan por la presencia de cloro u otros agentes oxidantes, generándose la correspondiente precipitación de oxihidróxidos coloreados poco solubles. Las coloraciones verdosas y azuladas están relacionadas a la presencia de óxidos de cobre, generalmente, en aguas naturales de lagos y embalses suele existir una relación directa entre color y pH (American Public Health Association et al., 2001).

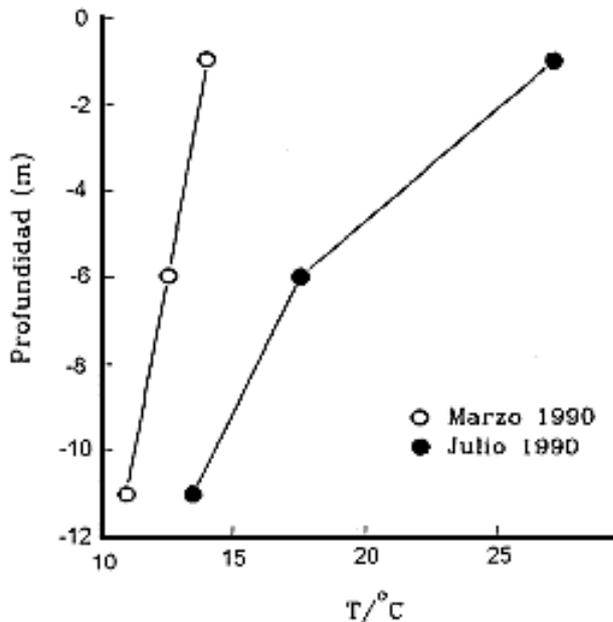
Es importante aclarar la diferencia entre color puro o real ya que es común que ambos términos no se entiendan claramente. El color real que es el color del agua cuya turbidez ha sido eliminada a través de la filtración; por otro lado, el término color aparente incluye el color que posee el agua debido a las sustancias disueltas y las materias en suspensión. Este último se determina en la muestra original sin filtrado ni centrifugado (Marín, 2010; Organización Panamericana de la Salud, 2004).

Finalmente, la importancia del color en el agua de consumo es fundamentalmente de carácter organoléptico ya que el de agua coloreada (con niveles de coloración mayor a 15 mg/L de Pt-Co), es asociada por el consumidor como no adecuada para la salud. Asimismo, en el tratamiento de aguas, las aguas fuertemente coloreadas ofrecen mayor resistencia a la acción desinfectante y oxidante del cloro y otros desinfectantes usados para su tratamiento (Ayora, 2010).

2.3.1.3. **Temperatura.** Es un indicador de energía cinética del agua o energía en movimiento. El incremento de la energía o movimiento molecular del agua se refleja en el aumento de temperatura. En otras palabras, la temperatura expresa el grado de calor y está en función a la absorción de radiación en la capa superficial del agua, de acuerdo a Marín (2010), aunque la temperatura del agua superficial está ligada a la irradiación recibida, fuentes de agua como embalses y lagos profundos, durante el año se observa un ciclo de 2 fases tal como muestra la Figura 1, los círculos vacíos representan el periodo de mezcla térmica; y los círculos llenos, la etapa de estratificación térmica.

Figura 1.

Perfil de temperaturas de un embalse



- Mezcla térmica: La temperatura en la superficie y en la profundidad es similar.
- Estratificación térmica: Las capas de agua no se mezclan, y debido a las diferencias de temperatura y densidad entre la superficie y el fondo se estratifican.

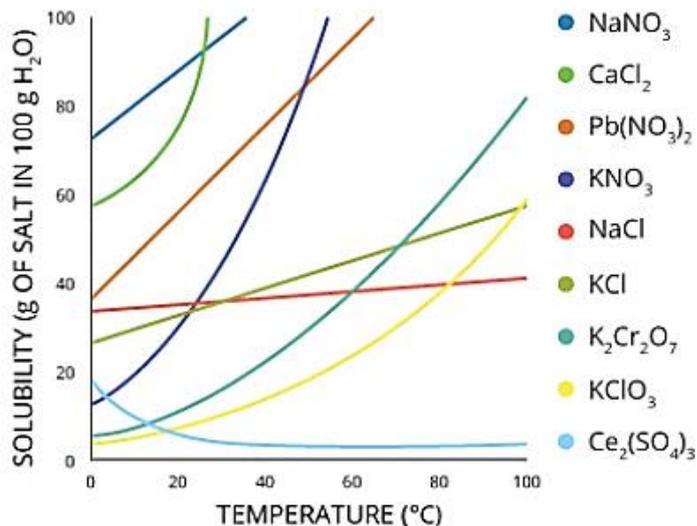
La temperatura influye en la aceleración de la actividad microbiológica generando cambios importantes en poblaciones bacterianas. En temperaturas cálidas y hasta cierto límite, el crecimiento y reproducción de organismos vivos es más acelerado. Incluso muchos de ellos toman como referencia la este parámetro para reproducirse o migrar (Fondriest Environmental Inc., 2014). Por otro lado, el agua caliente contiene menos oxígeno disuelto que el agua fría, y puede que no contenga suficiente oxígeno disuelto para la supervivencia de diferentes especies de vida acuática. Algunos compuestos también son más tóxicos para la vida acuática a temperaturas más altas (U.S. Geological Survey, 2012).

La temperatura también es importante debido a su influencia en la química del agua variando su densidad, su capacidad de adsorción de oxígeno, la precipitación

de compuestos y formación de depósitos. Se conoce también que la velocidad de las reacciones químicas crece junto a la temperatura, un ejemplo de esto es que el agua subterránea, tiende a tener temperaturas más altas permitiéndole disolver más minerales de las rocas y en consecuencia su conductividad eléctrica será más alta; en lo que respecta a las sales y su relación con la temperatura del agua, en la Figura 2 se demuestra que la presencia de diversos tipos de sales presentes en el agua varía de acuerdo a la temperatura (Ayora, 2010; Fondriest Environmental Inc., 2014).

Figura 2.

Solubilidad de sales a diferentes temperaturas (Fondriest Environmental Inc.,

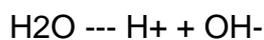


2014)

Con relación a los procesos de tratamiento de aguas, una temperatura baja dificulta la coagulación, sedimentación y filtración en la fase de potabilización, en contraste, temperaturas más altas tienen un efecto positivo en la desinfección. En este sentido, si no se ha realizado una correcta remoción de turbidez, la temperatura podría ser un factor adverso para la desinfección, ya que las sustancias húmicas en contacto con el cloro formarían rápidamente a mayor temperatura compuestos orgánicos tóxicos como trihalometanos ácidos holoacéticos, haloacetoneitrilos y halonitrometanos (Ayora, 2010; Marín, 2010, 2018).

Por último, considerando el punto de vista del consumidor, mientras el agua presente una temperatura entre 12°C y 16°C es más agradable que si presenta cualquier extremo de temperatura puede encontrarse desagradable (Organización Mundial de la Salud, 2006).

2.3.1.4. **pH.** El agua tiende a ionizarse en pequeñas proporciones, reduciendo los iones de hidrogeno (H⁺) y los iones de hidroxilos (OH⁻) como se muestran la siguiente ecuación.



Por el proceso de la ionización el agua es considerada como base, acida o neutra, el potencial de hidrogeno es una medida de actividad de los iones de hidrogeno (H⁺) y la medida indirecta de los iones hidroxilo (OH⁻) presentes en el agua.

Los iones H⁺ son las sustancias que aceptan los electrones cedidos por un metal cuando se corroe, este parámetro es un factor importante a tener en cuenta (Organización Mundial de la Salud, 2006).

La dosificación de coagulantes consume alcalinidad, generando una reducción de pH por lo cual es necesario la estabilización o ajuste para el tratamiento de aguas, este ajuste se realiza mediante la adición de un alcalinizante el cual forma una película controlada de carbonato de calcio (CaCO₃) evitando los problemas como la corrosión, agresividad e incrustación producidos por la distribución del agua (Cogollo, 2011).

La temperatura influye en el grado de disociación de los compuestos en solución modificando la concentración de los iones.

El pH es uno de los parámetros más importantes de la calidad del agua. Debido a que las aguas ácidas disuelven los metales empleados en las conducciones (plomo, cobre, zinc) que, al ser ingeridos, genera afecciones a la salud. El rango aceptable de

pH para agua potable varía entre 6.5 a 8.5 como valor guía según Marín (2018), para las aguas de consumo humano, los valores extremos pueden causar irritación en órganos internos, irritación en las mucosas, y hasta procesos de ulceración.

2.3.1.5. **Conductividad.** Es definida como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica, esto básicamente depende de la cantidad de iones, temperatura de la medición y la valencia. Gran parte de las soluciones con compuestos inorgánicos presentan elevada conductividad, debido a que las moléculas inorgánicas al no disociarse en el medio, conducen la corriente.

En las mediciones de laboratorio la medida física es la resistencia específica, el cual expresado en microhoh por centímetro el cual es equivalente a micro siemens por centímetro (uS/cm) o milisiemens por centímetro(mS/cm) en el sistema internacional de unidades (LENNTECH, 2019.).

Cabe mencionar que, en el agua, las sales minerales son excelentes conductoras, mientras que los coloidales y las materias orgánicas tienen una conductividad relativamente baja. El contenido de sales de un cuerpo natural de agua natural (arroyos, ríos) suele ir incrementándose a lo largo de su recorrido sobre el terreno, integrando cada vez más cantidad de sales en su seno. Por otro lado, el agua presenta una muy alta reactividad química, el cual involucra un alto poder de disolución de materiales (Marín, 2018).

2.3.2. Características químicas

A continuación, describimos los principales parámetros químicos de los cuerpos de agua empleadas para el tratamiento con fines de consumo humano.

2.3.2.1. **Alcalinidad.** Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos, o a nivel químico, aceptar protones. Es mejor que el agua tenga mayor alcalinidad para mejores resultados de coagulación. La alcalinidad es un parámetro del agua que mide la capacidad de neutralización de ácidos, se presenta por la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total} = 2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

Tal concentración es representada en mol/L y la alcalinidad total en equivalentes/L. Esto es definido mediante la titulación alcalimétrica al punto de equivalencia del ácido carbónico. La concentración de iones de carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) los cuales están estrechamente relacionados con el pH del agua y la concentración del carbono inorgánico total (CIT) mediante la disociación del ácido carbónico (Moel, Helm, Rijn, Dijk, & Meer, 2013).

2.3.3. Características microbiológicas

El agua recibe distintas formas de microorganismos provenientes del aire, suelo, y aguas residuales, Entre la variedad de microorganismos presentes en el agua están organismos eucariotas (algas, protozoarios y hongos), procariotas (bacterias) y virus.

- Bacterias: Existen bacterias naturales que no tienen importancia sanitaria debido a que no son patógenas, estas son: pseudomonas, flavobacterium, micrococos, sarcina, etc.
- Algas: organismos que contienen clorofila, mueren en medios anaerobios y su descomposición causa malos olores.
- Protozoarios: presentes en materia fecal y se instalan en las células del intestino y estómago; pudiendo causar diarrea, calambres intestinales, flatulencias, náuseas y gases.

- Virus: microorganismos causantes de enfermedades.

Las bacterias se alimentan de los nutrientes disueltos en el agua y dependen de sus condiciones físicas y químicas para permanecer, por tanto, la transmisión de enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos (protozoos y helmintos), bacterias, virus y parásitos microorganismos son causadas por una mala calidad de agua. (MINSA, 2011; Organización Mundial de la Salud, 2006)

Apella & Araujo (2005) agregan que los microorganismos pueden ser indicadores de la contaminación y/o calidad del agua como, por ejemplo:

- Coliformes fecales: Alertan sobre contaminación fecal
- Aerobias mesófilas: Comprueban la efectividad del tratamiento
- Pseudomonas: Advierten deterioro de calidad

2.3.4. Tipos de coagulante químico

Los principales tipos de insumos químicos usados para la coagulación son sales de aluminio y hierro, la eficacia de los coagulantes de aluminio y hierro se debe principalmente a su capacidad para formar complejos polinucleares de carga múltiple con características de adsorción mejoradas. La naturaleza de los complejos formados puede ser controlada por el pH del sistema.

Los coagulantes químicos son los más comúnmente usados en los procesos de tratamiento de agua potable, son: Sulfato de aluminio, policloruro de aluminio, alumbre y sales de hierro. Por lo general los más convenientes son elementos metálicos trivalentes como el hierro y el aluminio.

Los coagulantes metálicos de uso común se dividen en dos categorías generales: inorgánicos y orgánicos y mezclas de los mismos. Los hay basados en

aluminio y los basados en hierro. Los coagulantes de aluminio incluyen sulfato de aluminio, cloruro de aluminio y aluminato de sodio. Los coagulantes de hierro incluyen sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y sulfato de cloruro férrico. Otros productos químicos utilizados como coagulantes incluyen cal hidratada y carbonato de magnesio.

La eficacia de los coagulantes de aluminio y hierro se debe principalmente a su capacidad para formar complejos polinucleares de carga múltiple con características de adsorción mejoradas. La naturaleza de los complejos formados puede ser controlada por el pH del sistema. Cuando se agregan coagulantes metálicos al agua, los iones metálicos (Al y Fe) se hidrolizan rápidamente, pero de forma un tanto incontrolada, formando una serie de especies de hidrólisis metálica. La eficiencia de la mezcla rápida, el pH y la dosis de coagulantes determinan qué especie de hidrólisis es efectiva para el tratamiento.

Ha habido un desarrollo considerable de coagulantes inorgánicos prehidrolizados, basados tanto en aluminio como en hierro, para producir las especies de hidrólisis correctas independientemente de las condiciones del proceso durante el tratamiento. Estos incluyen clorhidrato de aluminio, cloruro de polialuminio, cloruro de sulfato de polialuminio, cloruro de silicato de polialuminio y formas de cloruro de polialuminio con polímeros orgánicos. Las formas de hierro incluyen sulfato poliférrico y sales férricas con polímeros. También hay mezclas de aluminio-hierro polimerizado (TRAMFLOC, 2019)

La neutralización de la carga eléctrica del coloide, objeto de la coagulación, se realiza aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); generalmente se aplica sulfato de aluminio, de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las

partículas coloidales dispersas en el agua. Las reacciones de coagulación son muy rápidas duran fracciones de segundo desde que se ponen en contacto las partículas con el coagulante (Ramírez, 2019).

La coagulación debida a la neutralización de la carga se logra preferiblemente con el coagulante en forma de complejos iónicos y en concentraciones más bajas, lo que requiere una rápida dispersión del producto químico en agua para garantizar una desestabilización óptima (Allerdings et al., 2015).

2.3.4.1. **Sulfato de aluminio.** Es un insumo que por sus características fisicoquímicas son empleados como coagulantes y floculantes en las plantas de tratamiento de agua potable, existen diferentes tipos de sulfatos de aluminio como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Tipos de sulfato de Aluminio y características

Características	Tipo A	Tipo A M20	Tipo B-200	Tipo B-500	Tipo A Solución 8%	Tipo B Solución 8%
Aluminio (Al ₂ O ₃) %	17 mín.	17 mín.	16 mín.	15.5 mín.	%7.8 a 8.2	%7.8 a 8.2
Basicidad %	0.6 máx.		0.70 máx.		0.20 máx.	
Hierro (Fe ₂ O ₃) %	0.05 máx.		0.50 máx.		0.10 máx.	0.35 máx.
Insolubles %	0.2 máx.		2.0 máx.	5.0 máx.	0.20 máx.	1.0 máx.
Apariencia			Granulado		Líquido	
Color	Blanco		Beige claro	Beige	Ligeramente amarillo	Beige
Densidad (g/cm ³)					1.30-1.35	
Presentación	Bolsa polipropileno 25 y 50 kg.		Bolsa polipropileno 50 kg.	Bolsa polipropileno 25 y 50 kg.	IBC 1.3 TM y Cisterna 25 TM	

a. **Sulfato de aluminio granulado tipo A.** Este insumo químico es una sal inorgánica que por sus características fisicoquímicas es empleada principalmente como coagulante y floculante primario en las plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales. Es un insumo químico que ayuda a agrupar a los sólidos

presentes en el agua, esto permite la aumentar la velocidad de sedimentación de los mismos, esto permite reducir la carga de microorganismos presentes en el medio, así como la remoción de sabor y color. Este insumo corresponde a un hidrato de 14 moléculas de agua, presenta la siguiente formula general $Al_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$.

El sulfato de aluminio se disocia en cationes y aniones cuando están solución, donde el catión Al^{+3} terminan hidrolizándose formando una estructura tetraédrica en combinación con las moléculas del agua, favoreciendo el proceso fisicoquímico del proceso de coagulación y posterior floculación de los flocs formados.

Características:

- Aspecto: blanco, sólido granulado, soluble en agua.
- Análisis granulométrico:
- Características Especificación
- Malla 4, pasante, % 100
- Malla 10, pasante, % 60 mín.
- Malla 50, pasante, % 20 máximo

Este insumo químico es empleado como coagulante para la remoción de partículas en suspensión en todo tipo de aguas, ya sea para uso doméstico o industrial. Este insumo permite suministrar iones capaces de neutralizar las cargas eléctricas de las partículas coloidales presentes en el agua y así permitir la posterior sedimentación. Los flóculos presentan propiedades esponjosas que favorecen la adhesión de partículas, coloides o semicoloides.

El floculo que es formado por el sulfato de aluminio al entrar en contacto con el agua en concentraciones diluidas es el hidróxido de Aluminio. La formación efectiva

de este floculo se da en un rango de pH entre 5.5 a 8, la dosificación optima se deberá obtener con las pruebas de tratabilidad en laboratorio.

b. **Sulfato de Aluminio granulado tipo B.** Este insumo químico presenta propiedades químicas similares al sulfato de Aluminio tipo A, sin embargo, presenta un mayor contenido de hierro, es por ello que en algunas aguas presenta un excelente desempeño como coagulante,

El Sulfato de Aluminio Tipo B, por su contenido de hierro, presenta un excelente desempeño como coagulante, debido a su mayor afinidad para remover compuestos orgánicos causantes de color en el agua. Los insumos básicos para la preparación de este coagulante son Ácido sulfúrico y minerales con alto contenido de alúmina, este producto tiene dos presentaciones líquido y solido (Polvo o granulado), las Figuras 3 y 4 se observan los mecanismos de coagulación por absorción y barrido en el agua.

Figura 3.

Coagulación por absorción

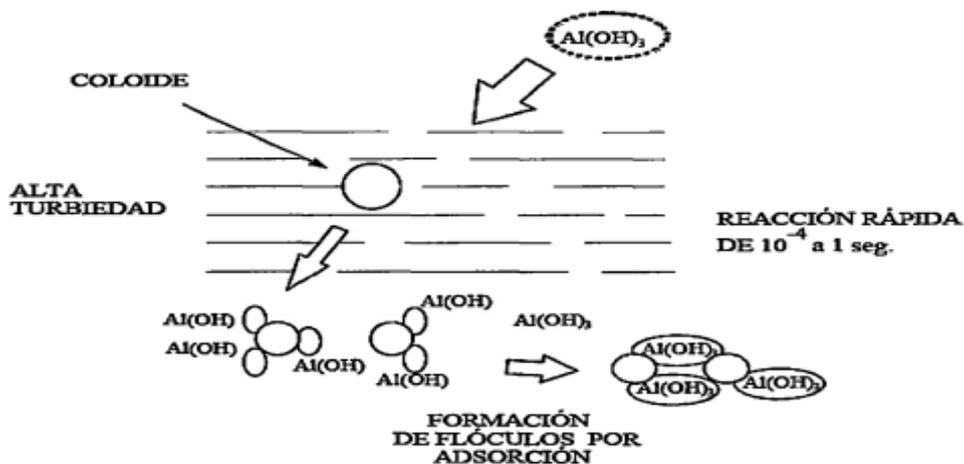
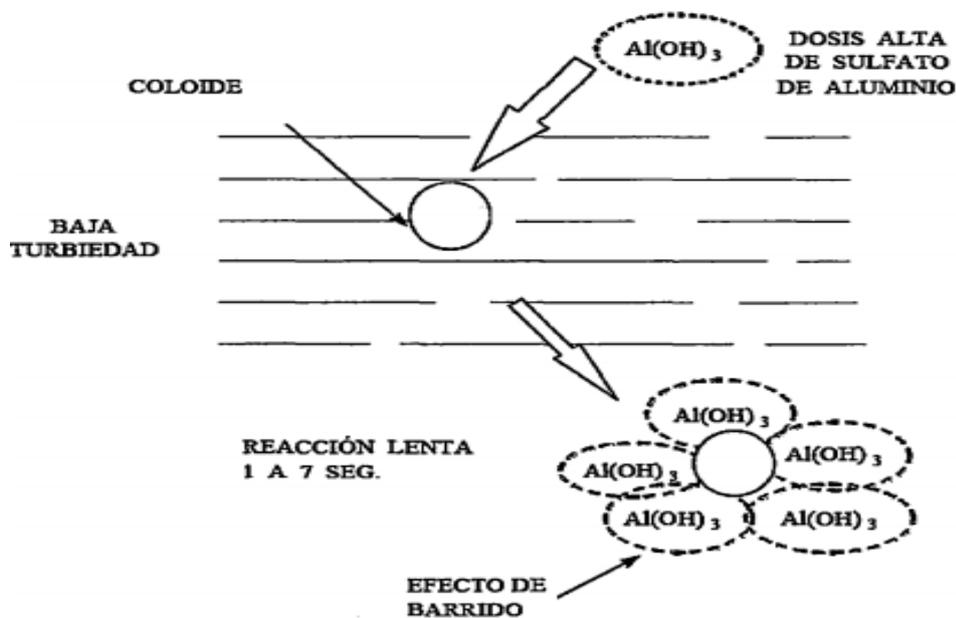


Figura 4.

Mecanismo de la coagulación por barrido

2.3.4.2. **Cloruro férrico.** El cloruro férrico es un producto químico muy utilizado en tratamiento de agua gracias a sus propiedades físicas y químicas, entre las que destaca su amplio rango de pH. En solución, el cloruro férrico, es un coagulante inorgánico muy eficaz en la eliminación de sólidos suspendidos, rastros de metales y en la reducción de la DBO. (Cinética química, 2017).



2.3.4.3. **Policloruro de aluminio.** Es un insumo químico empleado como coagulante inorgánico, base policloruro de aluminio básicamente para remover coloides en suspensión en el agua, son empleadas en las plantas potabilizadoras de agua, y para el tratamiento de efluentes industriales. Este compuesto incluye una serie de productos que varía en el grado de su neutralización ácida, concentración de $Al(OH)_3$ y polimerización, este último es debido a una mayor carga catiónica y en aumento la capacidad del desempeño. El grado de neutralización ácida se mide por la basicidad que puede variar desde 0% (solución de cloruro de aluminio) hasta un

83% (solución de clorhidrato de aluminio). Generalmente, los productos disponibles de policloruro de aluminio, tienen una basicidad que se encuentra en un rango de 10-70%.

2.3.5. *Planta de tratamiento de agua potable*

Una planta de tratamiento de agua potable consiste en una serie de componentes que brindan a través de diferentes procesos un tratamiento al agua para que esta pueda cumplir con la calidad exigida para su consumo. Según De Vargas (2004b) los principales procesos de transferencia empleados en el tratamiento de agua son: Transferencia de sólidos, iones, gases y molecular o de nutrientes.

Para remoción de partículas a través de medios físicos:

- Desarenadores
- Sedimentadores
- Pre filtros de grava
- Filtros lentos

Para la remoción de partículas empleando medios fisicoquímicos:

- Desarenador
- Mezcla rápida
- Flocculador
- Decantador
- Filtro rápido

2.3.6. Procesos unitarios de plantas de tratamiento de agua potable con tecnología CEPIS filtración rápida

2.3.6.1. Coagulación. La coagulación es un proceso de desestabilización de las partículas que se encuentran dispersas en el agua (coloides) a través de la aplicación de insumos químicos y una agitación rápida que genera la interacción entre los iones positivos del coagulante y los iones negativos del sistema coloidal en suspensión, eso causa que se neutralicen las cargas superficiales de las partículas lo cual facilitará la formación de cuerpos más pesados y de mayor Volumen que podrán sedimentar y ser removidos del agua con mayor facilidad, esto se puede apreciar en la Figura 5 (Andía, 2000; Barrenechea, 2004).

En la eficacia de la coagulación influyen diversos factores entre los que destaca el pH y otras características físico-químicas del agua, así como una adecuada energía de agitación rápida para conseguir una apropiada dispersión del coagulante y proporcionar las necesarias colisiones entre las partículas para conseguir una óptima coagulación (Ramírez, 2019).

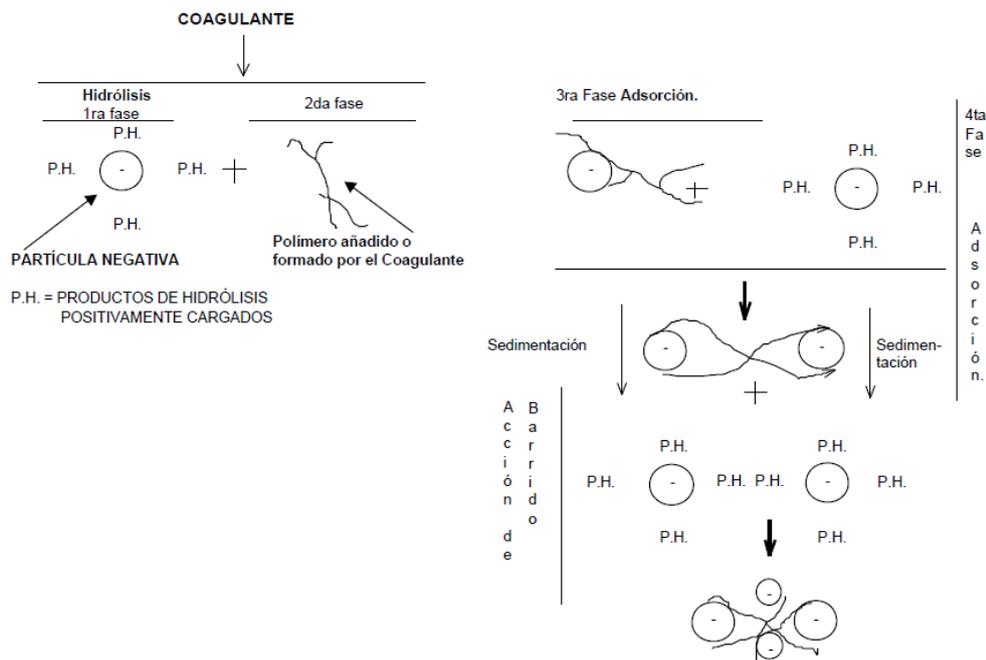
La etapa de mezcla rápida es posiblemente el componente más importante de los procesos de coagulación, ya que es aquí donde se producen las reacciones de desestabilización y donde se forman las partículas primarias del floc, cuyas características influyen notablemente en la cinética de floculación posterior. En general, es probable que los productos de hidrólisis del coagulante metálico que se forman dentro del rango de tiempo de 0.01 a 10 segundos sean los más importantes para una desestabilización efectiva. De hecho, más allá de un cierto tiempo de mezcla, puede producirse un efecto perjudicial sobre la eficiencia de la floculación (Barrenechea, 2004; International Water Association, 2019).

Tanto la turbulencia como el tiempo de mezcla son parámetros importantes para el proceso de coagulación y posterior floculación. Los gradientes de alta velocidad generalmente se aplican en el punto de adición del coagulante. Esto asegura una rápida distribución de la sustancia química en el agua y la rápida formación de núcleos de flóculos (Allerdings, Förster, Vasyukova, & Uhl, 2015).

Inmediatamente después de la adición de coagulantes, se forman especies coagulantes activas, mismas que promueven la desestabilización y el contacto Inter coloidal en la mezcla rápida, en la Figura se representa el mecanismo de desestabilización de las partículas (Kan, Huang, & Ruhsing Pan, 2002).

Figura 5.

Fases de la desestabilización (Andía, 2000)



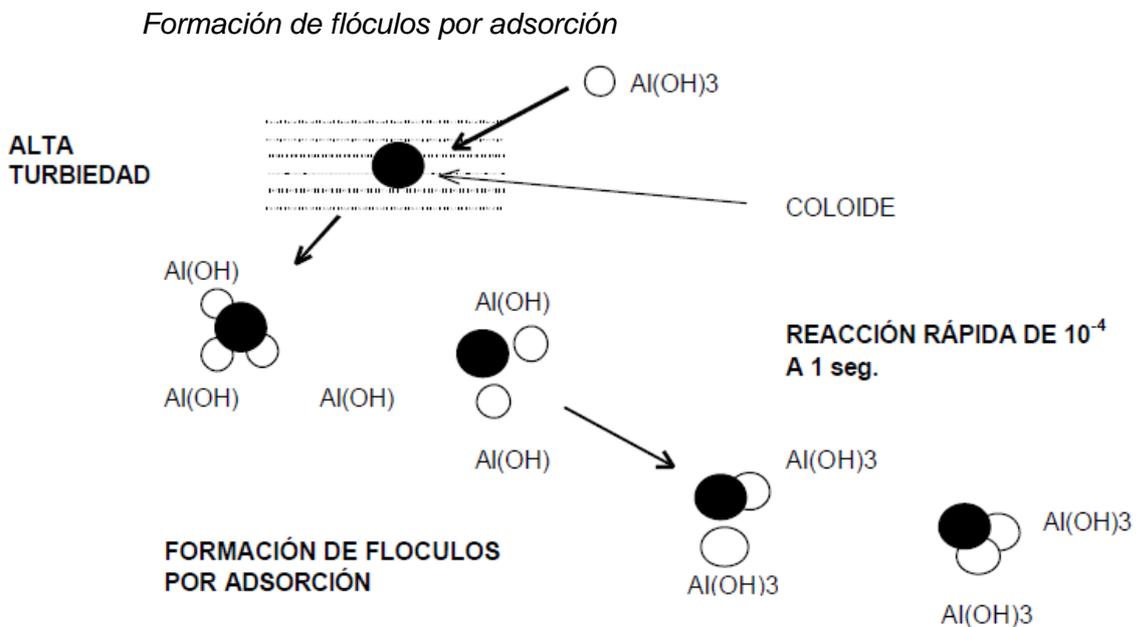
2.3.6.2. Etapas de la coagulación. El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas.

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de Compuestos químicos poliméricos.

- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

2.3.6.3. Coagulación por adsorción. Se aplica cuando el agua presenta una alta concentración de coloides; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flocúlos en forma casi instantánea como se observa en la Figura 6 (Andía, 2000).

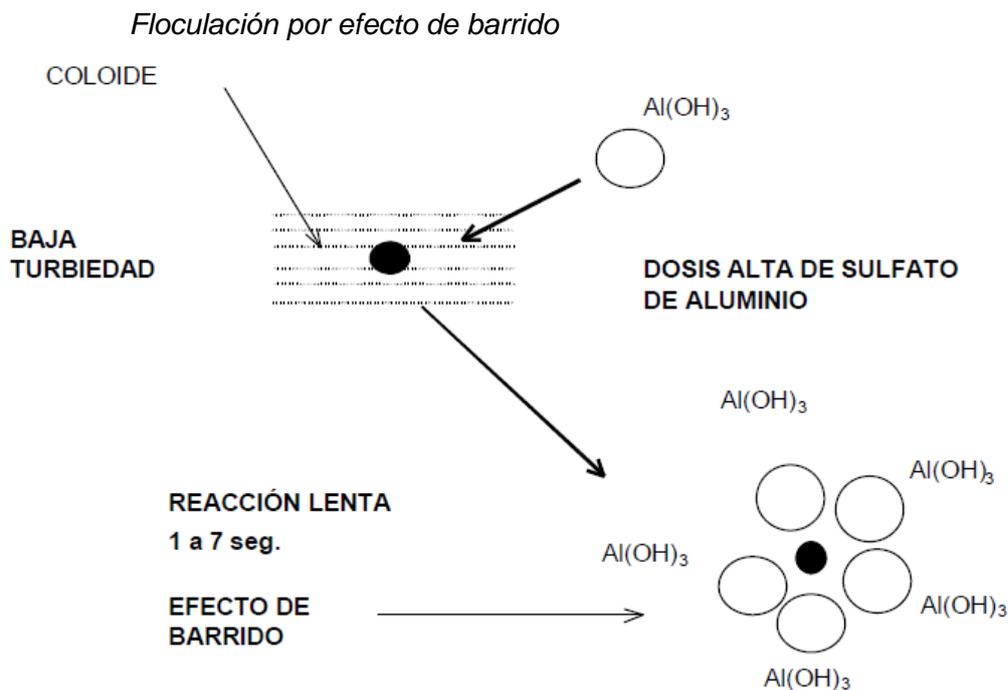
Figura 6.



2.3.6.4. Coagulación del color. En general el color de un agua es debido a la descomposición de la materia orgánica que contienen los humos de los suelos; esto depende de una gran variedad de compuestos orgánicos como las sustancias húmicas que son de masa molecular variada de 800 a 50000 gr/mol. Los mecanismos que permiten la eliminación del color son el tiempo de retención y velocidad de agitación, así como las dosis adecuadas de insumos químicos (Andía, 2000).

2.3.6.5. Coagulación de barrido. La coagulación de barrido prevalece cuando se aplican dosis químicas más altas, de modo que el coagulante precipita rápidamente después de la disolución y, por lo tanto, pierde su capacidad de neutralización de carga como muestra la Figura 7 (Allerdings, Förster, Vasyukova, & Uhl, 2015).

Figura 7.



Este tipo de coagulación se presenta cuando la cantidad de partículas coloidales es muy baja; en este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico (Andía, 2000).

2.3.6.6. Factores que influyen en la coagulación

a. **Influencia del pH.** Para cada tipo de agua se tiene un rango de pH óptimo para que la coagulación se dé rápidamente, dependiendo de los iones y la alcalinidad de agua. Si la coagulación se realiza fuera del rango óptimo de pH, la dosis de coagulante requerida será más alta. Según los estudios realizados, el nivel de pH

recomendable de coagulación cuando se usa sales de aluminio es de 6.5 a 8 y para sales de hierro es de 5.5 a 8.5 unidades (Andía, 2000).

Durante el proceso de coagulación, el pH del agua afecta la química de los coagulantes, como la solubilidad y la especiación, así como la carga en las partículas y materia orgánica natural en términos generales, el proceso de coagulación funciona mejor si el pH práctico está cerca del pH de solubilidad mínima del coagulante (Geng, 2005)

b. ***Influencia de sales disueltas.*** La presencia de sales en el agua modifica los siguientes aspectos:

- Rango de pH óptimo
- Tiempo requerido para floculación
- Cantidad de coagulante requerido
- Cantidad de coagulante residual en el efluente

c. ***Influencia de la temperatura del agua.*** Como ya se ha mencionado, la temperatura modifica la densidad del agua, por otro lado, las energías cinéticas de las partículas en suspensión varían; al descender la temperatura, se ralentiza la coagulación, asimismo temperaturas muy altas tampoco son favorables (Andía, 2000).

El rango de pH óptimo varía con la temperatura, decrece junto con ella. Temperaturas cercanas al punto de coagulación no son favorables para la remoción de turbidez, por el contrario, entre 10°C y 40°C la eficiencia es superior a mayor temperatura ya que como se mencionó líneas arriba, la tasa de colisión entre partículas se incrementa (Barrenechea, 2004).

Geng (2005) agrega que el agua con menores temperatura disminuye la solubilidad de coagulantes como alumbre y policloruro de aluminio, incrementa la viscosidad del agua y retarda la cinética de las reacciones de hidrólisis y floculación de las partículas. También afecta significativamente en la turbidez y el recuento de partículas durante la coagulación, el carbono orgánico disuelto y la eliminación de color no son sensibles a la temperatura.

d. ***Influencia de la dosis de coagulante.*** Si la cantidad de coagulante no es suficiente, no se neutraliza por completo la carga de la partícula y se forman muy pocos microflóculos, además la turbidez es elevada.

Si por el contrario la cantidad empleada es muy alta, existe el riesgo de invertir la carga de la partícula y formar microflóculos en exceso que tienen tasas de sedimentación muy bajas, como resultado la turbidez será muy alta.

También la dosis de coagulante afecta a la calidad del agua clarificada, el funcionamiento de los decantadores y filtros pudiendo colmatarlos.

e. ***Influencia de la mezcla rápida.*** Para una coagulación completa, el insumo debe esparcirse uniforme y totalmente en toda la muestra, por tal motivo la turbulencia de agitación debe ser uniforme e intensa para asegurar que se ha producido la anulación iónica de las partículas suspendidas.

f. ***Sistema de aplicación.*** El sistema de aplicación debe permitir un caudal constante y fácilmente regulable y que el coagulante caiga en su totalidad en el agua.

2.3.7. Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los

flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

Para un correcto proceso de floculación intervienen gradientes que optimizan el proceso estas gradientes normalmente varían entre 70 y 20 S-1, es necesario que la gradiente varíe uniformemente en forma decreciente desde el ingreso de la masa de agua hasta la salida de la unidad, el tiempo de retención normalmente varía entre 20 y 30 minutos.

En el caso de que el floculo formado en el proceso anterior no presente el tamaño suficiente que le permita su posterior decantación es necesario emplear insumos químicos denominados floculantes, este insumo permitirá formar una red o puentes de una superficie a otra enlazando las partículas en suspensión, el cual es mostrado en la Figura 8 (Oré, 2014).

Figura 8.

Formación de puentes por un floculante



El floculante tiene una capacidad de formar puentes entre las partículas aglomeradas para la formación de flocs de mayor tamaño y su posterior decantación

con facilidad. En este proceso intervienen dos procesos la floculación pericinética y la floculación ortocinética

2.3.7.1. **Floculación pericinética.** Este comportamiento es generado por el movimiento natural de las moléculas del agua inducida por la energía térmica, también es conocida como el movimiento browniano.

2.3.7.2. **Floculación ortocinética.** Este proceso ocurre con la colisión de las partículas debido al movimiento del agua, el cual es inducido por una energía exterior este puede ser energía hidráulica o mecánica.

2.3.7.3. **Parámetros de floculación.** Los parámetros son los siguientes:

- Floculación ortocinética
- Gradiente de velocidad
- Numero de colisiones
- Tiempo de retención
- Densidad y tamaño del floc
- Volumen de lodos

2.3.7.4. **Floculantes**

Son polímeros que presentan pesos moleculares muy elevados, solubles en el agua formada por bloques de monómeros en cadenas largas, estos pueden ser: Orgánico natural, mineral y orgánico de síntesis.

a. **Floculantes Minerales.** Encontramos a la sílice activada, de disolución complicada y presenta riesgo de gelatinización, genera la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución.

b. **Floculantes orgánicos naturales.** Polímeros naturales de origen animal o vegetal, alginatos cuya estructura polimérica son los ácidos maniránicos y los glucónicos.

c. **Floculantes orgánicos de Síntesis.** Son macromoléculas, conseguidas por asociación de monómeros sintéticos con elevada masa molar de 106 y 107 gr/mol, clasificados por su ionicidad de polímeros: Catiónicos, que presentan copolímero de acrilamidas más un monómero catiónico, neutro o no iónicos son poli(acrilamidas) y aniónicos que están compuestos por copolímero de la acrilamida del ácido acrílico (Andía, 2000).

d. **Riesgos y desventajas.** A pesar de sus bondades, también existen algunas desventajas que deben ser consideradas antes de aplicarlos. El principal problema está relacionado al manejo y operación de las sustancias poliméricas en los sistemas de dosificación, mezclado y altos costos en situaciones particulares son aspectos que se deben considerar (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation, 2001). Las desventajas y riesgos que involucra el uso de polímeros en el tratamiento de agua se describen a continuación por Martínez (2015):

- El almacenamiento, mezclado y sistemas de alimentación de polímeros son diferentes que los utilizados para los coagulantes convencionales y deben ser adquiridos y debidamente instalados.
- Algunos polímeros son abastecidos con muy alto o muy bajo pH, por lo tanto, requieren de contenedores de materiales especiales para su almacenamiento.
- En algunos casos, los polímeros deben ser mezclados con agua caliente y se requiere adquirir e instalar un calentador especial.

- Agua con alto contenido de cloro residual degrada algunos tipos de polímeros.
- Polímeros con alta viscosidad requieren equipos de bombeo especiales, además, estos polímeros son peligrosos cuando se derraman porque son extremadamente resbalosos.
- Debido a la complejidad de los procesos de polimerización para fabricar polímeros sintéticos y a la vulnerabilidad de estos productos a distintas reacciones, existen dificultades para asegurar que sus características son uniformes. Muchos vendedores proporcionan muy pocos datos técnicos en sus productos y muchas veces no son responsables de su manufacturación.
- En muchas fórmulas de polímeros se presentan trazas de posibles impurezas nocivas, sin embargo, si su concentración es menor a la máxima recomendada no representa una amenaza a la salud.
- Los polímeros ayudantes de filtración presentan desventajas si su dosis no es apropiada una sobredosis podría incrementar la adherencia de sólidos en el filtro que son difíciles de remover.
- Requiere que un profesional capacitado y equipado realice la preparación, y dosificación del polímero en la planta.
- Requiere de la instalación adicional de un dosificador a la entrada del floculador.

2.3.8. Sedimentación

De acuerdo con Maldonado (2004b), la sedimentación es un proceso que permite conseguir la clarificación del agua floculada y está relacionada exclusivamente con las propiedades de sedimentación de las partículas, según Centers for Disease Control and Prevention (2015) los flocs, por su peso y debido al efecto de la gravedad se depositan en la parte inferior del sedimentador. Añadiendo

a esto, la International Water Association (2019) sugiere que la sedimentación puede ser aplicada antes de la coagulación para reducir la cantidad de insumos químicos necesarios, asimismo cuando se aplica antes de la filtración reduce significativamente la concentración de sólidos en suspensión para que este proceso pueda funcionar con mayor efectividad.

2.3.9. Filtración

La filtración es la operación final que se realiza en la planta de tratamiento de agua, una vez los flocs se han depositado en el fondo, el agua clara que quedó en la superficie debe atravesar un medio poroso en el que se remueve los sólidos o el material coloidal más fino, que no alcanzó a ser removido en los procesos anteriores (De Vargas, 2004b). Maldonado (2004a) aclara que ocurren dos procesos complementarios, primero las partículas que se desean remover son transportadas a la superficie de los granos del medio filtrante y seguidamente quedan adheridas a éste.

2.3.10. Unidades de tratamiento de agua potable

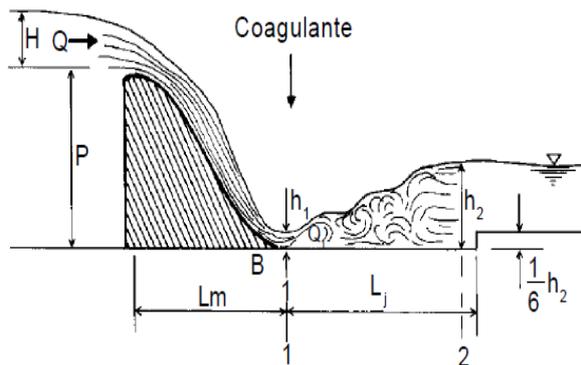
2.3.10.1. Mezcla rápida. Los mezcladores tienen como objetivo la dispersión instantánea del coagulante en toda la masa de agua que se va a tratar. La dispersión debe ser homogénea para desestabilizar todas las partículas presentes en el agua, de ello depende la eficiencia de todo el sistema, para que la aplicación del coagulante se distribuya de manera uniforme debe existir una fuerte turbulencia que se puede conseguir en dispositivos hidráulicos o mecánicos (De Vargas, 2004c). La inyección de coagulante se realiza justo sobre el flujo turbulento producido por el salto hidráulico. Esto garantiza una mezcla homogénea de la sustancia química en el agua

y la rápida formación de núcleos de flocúlos (Allerdings et al., 2015). El flujo turbulento o salto hidráulico se observa en las vistas de corte de la Figura 9.

La gradiente de velocidad generada por turbulencia en el tanque y el tiempo de mezcla son parámetros importantes para el proceso. La intensidad de agitación, expresada en gradiente de velocidad, puede variar de 700 a 1.300 S^{-1} o de 3.000 a 5.000 S^{-1} según el tipo de unidad seleccionada, asimismo el tiempo de retención puede variar de décimas de segundos a siete segundos, dependiendo de la concentración de coloides en el agua por tratar (De Vargas, 2004c; IWA, 2019a)

Figura 9.

Canal con cambio de pendiente y vertedero rectangular (CEPIS, 2006)



2.3.10.2. Floculadores. Son estructuras que han sido diseñadas con el fin de favorecer la aglomeración de las partículas desestabilizadas con la adición previa del coagulante, en esta unidad se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, formando otras de mayor tamaño, facilitando de esta forma su posterior decantación (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2009). Existen floculadores de flujo horizontal y vertical como se muestra en la Figuras 10, 11, 12 y 13.

Figura 10.

Floculador de pantallas de flujo horizontal (CEPIS, 2006)

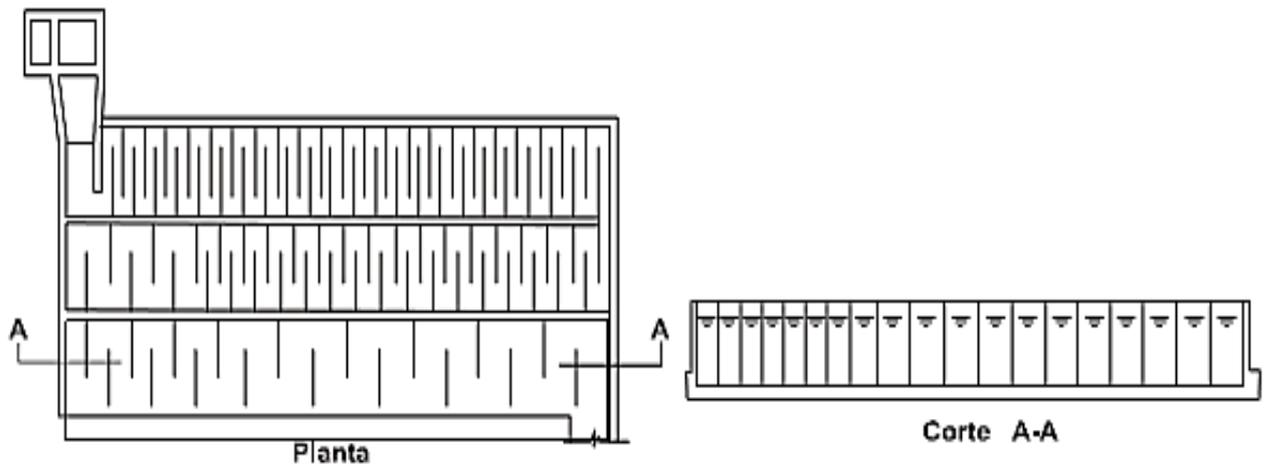


Figura 11.

Reducción de gradiente de velocidad a lo largo del tramo de los floculadores

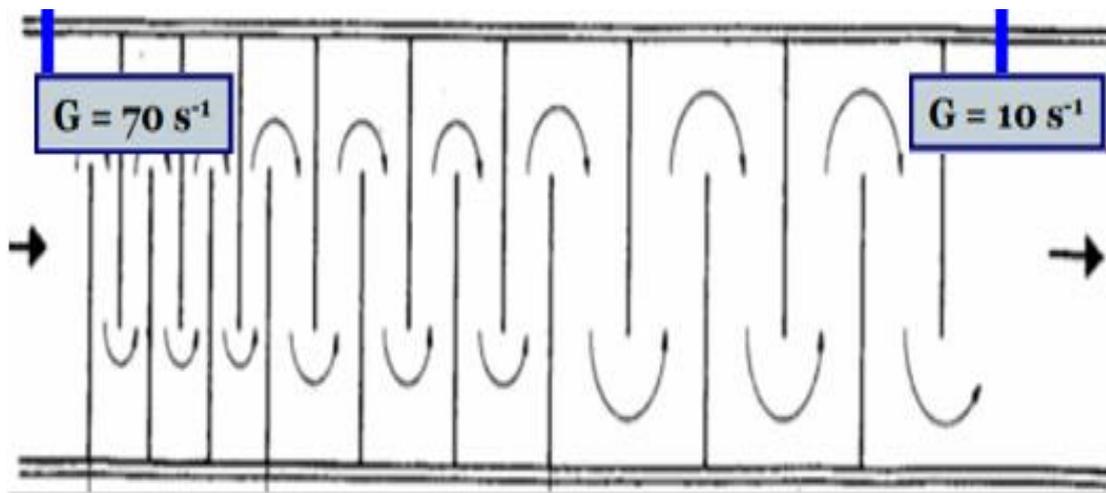


Figura 12.

Floculador de flujo horizontal

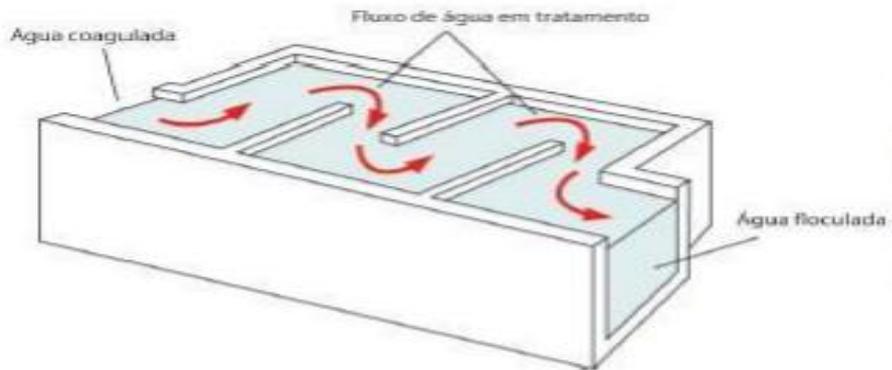
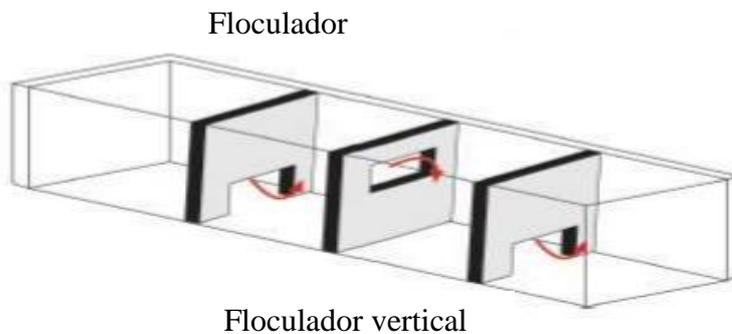


Figura 13.

Floculadores de flujo vertical



Floculador horizontal

2.3.10.3. Criterios generales para el diseño de la unidad de floculadores

- La gradiente de velocidad necesaria tiene que variar uniformemente y en forma

Floculador vertical

decreciente a lo largo de los tramos de la unidad.

- El tiempo de retención hidráulica es determinado en el laboratorio, este parámetro puede variar entre 10 y 30 minutos de acuerdo al tipo de agua que se pretende tratar.

- Para permitir que el periodo de retención coincida con el tiempo que requiere el diseño es necesario contar con el mayor número de compartimientos.
- Evitar las interconexiones largas entre el mezclador y la floculación, tratar en posible que sea instantáneo.
- El tiempo de retención y las gradientes optimas van a depender de las características del agua que se pretende tratar, por ello es necesario realizar pruebas de tratabilidad en el laboratorio.
- Estas unidades pueden operar sin ninguna dificultad a lo largo del tiempo ya que solo requieren de la energía hidráulica, es por ello la confiabilidad en su operación e incluso implica bajos costos de operación y mantenimiento
- Para las pantallas se pueden emplear placas removibles de concreto, fibra de vidrio, madera, plástico, cemento u otro material.

2.3.10.4. Decantadores. Esta unidad de tratamiento posee una serie de placas inclinadas, con eso se logra que haya una mayor superficie de decantación, en esta unidad los flocs formados sedimentan en láminas inclinadas y por gravedad, caen en el nivel más bajo del decantador (CEPIS, 2006b). Las Figuras 14, 15 y 16 se presenta diversas vistas de la unidad de decantadores.

Figura 14.

Decantador de placas de flujo ascendente

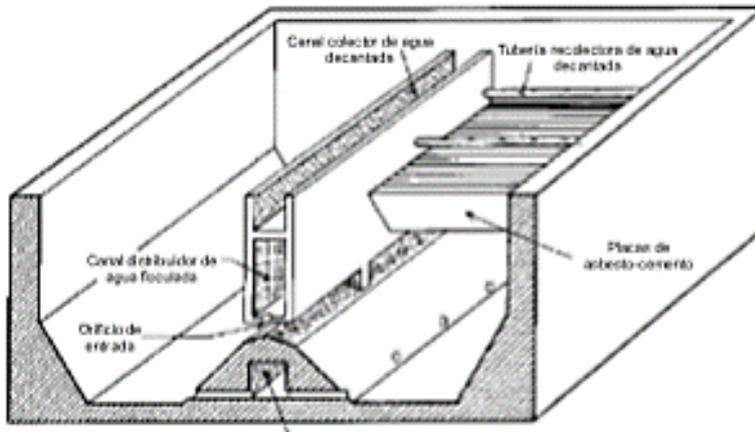
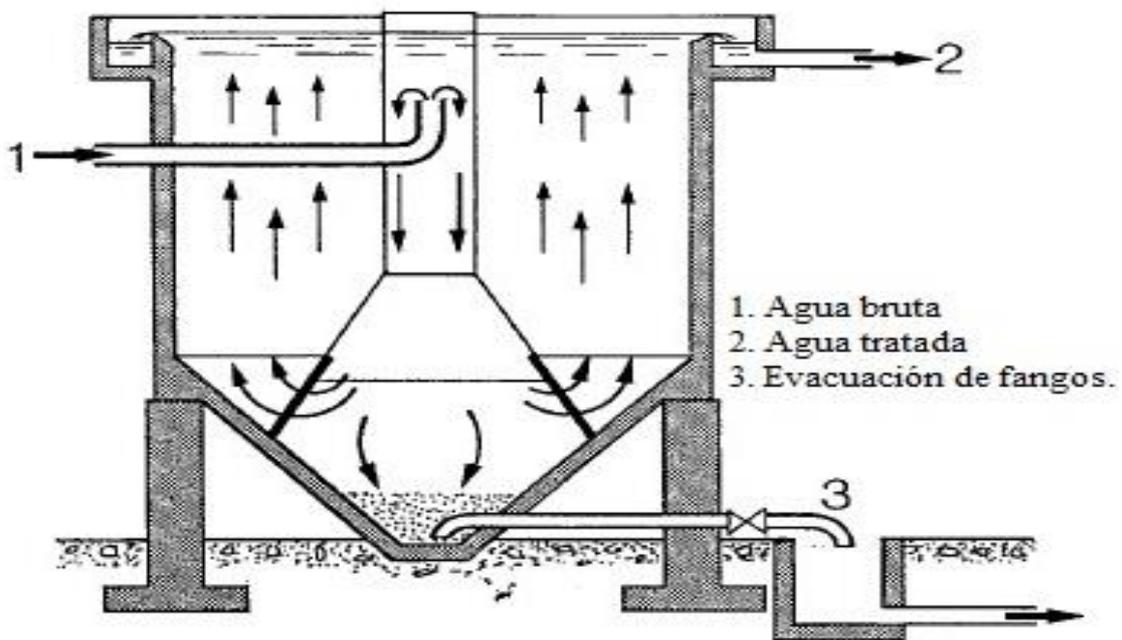


Figura 15.

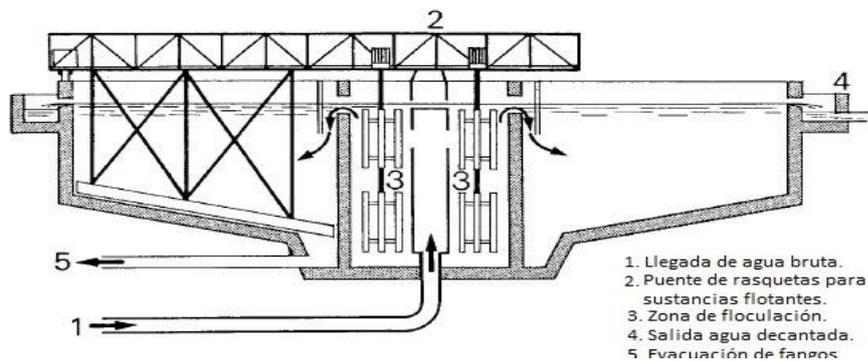
Decantador de placas de flujo ascendente.



Nota. Vista de corte de un decantador de placas de flujo descendente. Recuperado de GEDAR, 2017 (<https://www.gedar.com/wp-content/uploads/Decantador-conico-cilindrico-1.jpg>). En el dominio público

Figura 16.

Decantador de placas de flujo ascendente



a. Consideraciones a tener en cuenta para el diseño de la unidad. Uno de los parámetros más importantes en el proceso es la velocidad de sedimentación que depende directamente de las características del agua que se pretende tratar, para este caso es necesario determinar la velocidad de sedimentación con las pruebas de tratabilidad. Las cargas superficiales normalmente oscilan entre 120 y 180 m³/m²/d, con eficiencias de remoción por encima del 90% es por ello indispensable realizar la prueba de tratabilidad para determinar la tasa de decantación dicho criterio es recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

- El número en los decantadores es la consecuencia de la geometría de los elementos tubulares y la velocidad de flujo.
- En el diseño es necesario considerar entrada, salida, almacenamiento y extracción de lodos.
- Zona de entrada. Dependiendo al diseño canal o tubería para la distribución uniforme de agua floculada a los módulos de placas del decantador.
- Zona de decantación. Es la parte del decantador compuestas por las placas según sea el material pueden ser de vinilona, planchas de cemento. Fibra de vidrio, etc.

- Zona de salida. Permite la recolección del agua decantada mediante tuberías perforadas, canaletas, dependiendo de la capacidad de la planta.
- Zona de depósito y extracción de los lodos. Tolvas múltiples de almacenamiento de lodo mediante colectores múltiples.

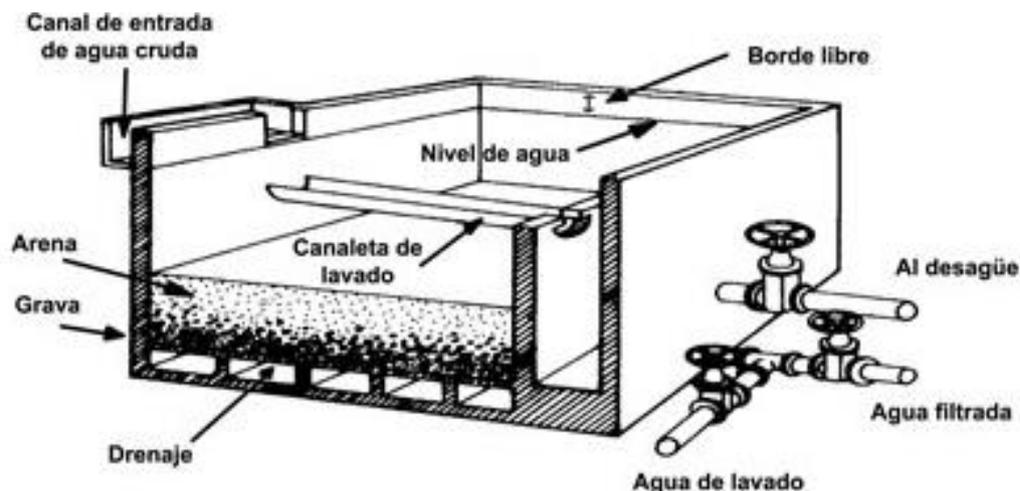
2.3.11. Filtros rápidos

Es una de las unidades más complejas que presenta una planta de tratamiento de agua potable debido a su correcta concepción de la interrelación entre la característica de suspensión del afluente y los rasgos del medio filtrante.

La filtración es la operación final que se realiza en la planta de tratamiento de agua, sirve para remover del agua los sólidos o el material coloidal más fino, que no alcanzó a ser removida en los procesos anteriores (CEPIS, 2006a). A continuación, en la Figuras del 17 al 19 se puede observar en una vista de corte los diversos componentes de la batería de filtros.

Figura 17.

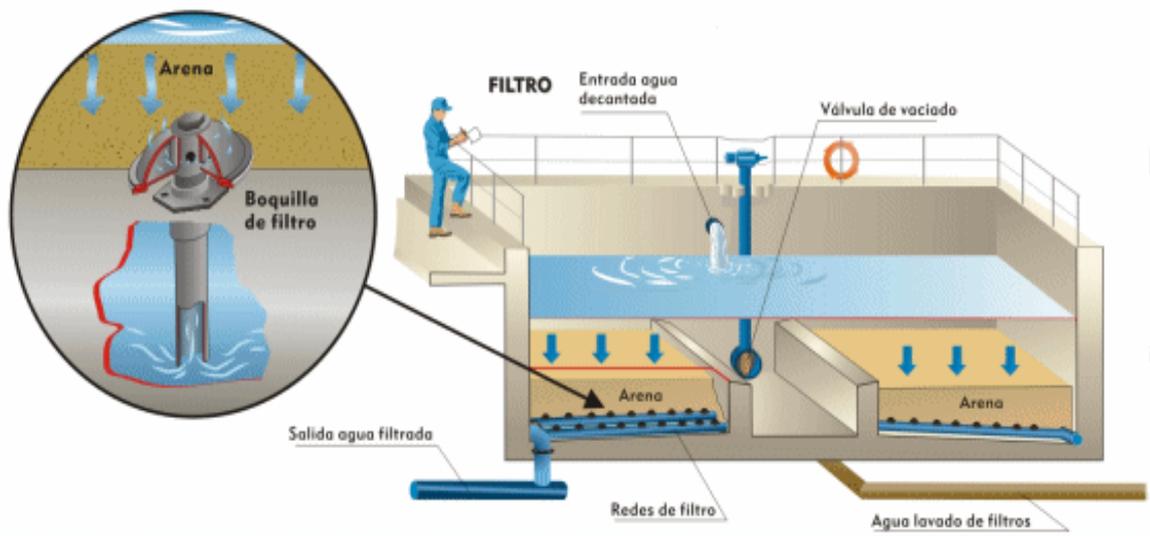
Componentes de la batería de filtros de tasa declinante.



Nota. Vista de corte de batería de filtros. Recuperado de CEPIS, 2013. (<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/2-3sas.htm>). En el dominio público.

Figura 18.

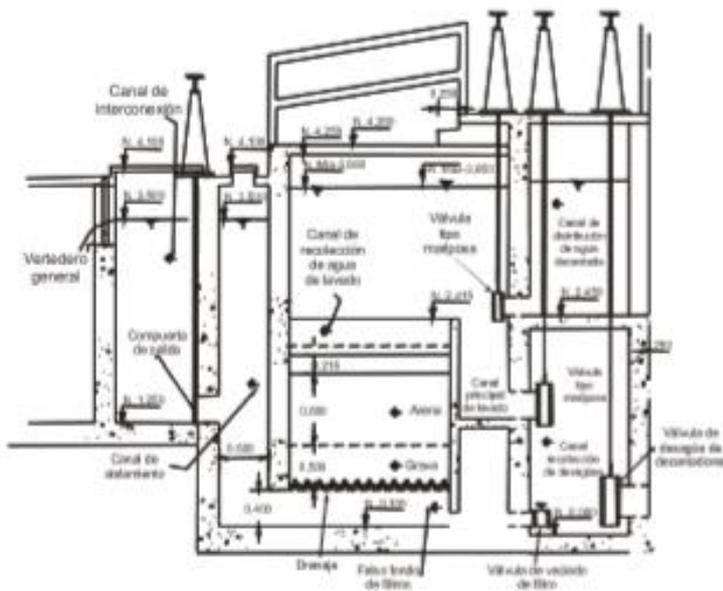
Batería de filtros de tasa declinante. Recuperado de:



<http://www.elaguapotable.com/filtracion.htm>

Figura 19.

Vista de corte transversal de los filtros.



2.3.11.1. Descripción de los componentes de la unidad de filtración.

- Caja del filtro. Una de los componentes más importantes de este proceso, el falso fondo, el drenaje conformado por las viguetas, graba empleada como material de

soporte, el material filtrante, con un canal principal de lavado, el cual decepciona agua proveniente del retrolavado recolectada por las canaletas secundarias. Las cargas de agua necesarias para el funcionamiento de la batería (carga hidráulica para el lavado y carga hidráulica para el proceso de filtrado) se ubican por encima de este nivel los cuales determinan la profundidad total de la caja del filtro y se limitan mediante vertederos.

- Canal de distribución de agua decantada. El canal que permite la distribución uniforme del agua decantada en las baterías de los filtros, este ingreso es mediante válvulas de entrada, en la parte superior se encuentra el vertedero que limita la carga máxima disponible que permite la operación de la unidad con tasa declinante.
- Canal de desagüe de agua de retrolavado. Ubicado debajo del nivel del canal de distribución, decepciona el agua del retrolavado de los filtros.
- Canal de aislamiento. Este canal permite aislar la unidad del resto de baterías, cerrando la compuerta de ingreso y los canales que permiten la interconexión.

2.4. Marco conceptual

Agua Potable: Es el agua cuyas características físicas, químicas y microbiológicas han sido tratadas a fin de garantizar su aptitud para consumo humano (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Agua Cruda: Es el agua que se encuentra en la naturaleza y que no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características: físicas, químicas o microbiológicas (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Límite máximo permisible: Representa un requisito de calidad del agua potable que fija dentro del ámbito del conocimiento científico y tecnológico del

momento un límite sobre el cual el agua deja de ser apta para consumo humano (ECOFLUIDOS INGENIEROS, 2012).

Calidad del agua: Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua fijados en los límites máximos permisibles presentados por la normativa nacional de calidad de agua, basado en datos científicos, para el cual no hay ningún tipo de efectos, generalmente adversos, en su uso por el hombre o para los organismos que lo habiten (ECOFLUIDOS INGENIEROS, 2012).

Afluente: Caudal de agua que ingresa a una unidad de tratamiento (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2009).

Caudal: La RAE lo define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección (Tubería, cañería, oleoducto, río, canal) por una unidad de tiempo, dicho volumen expresado en litros por segundo (L/s) para el cual es diseñada la unidad.

Control: Proceso permanente y sistemático de comprobación, mediante programas establecidos de muestreo y otros procedimientos.

Efluente: Líquido que sale de un proceso de tratamiento Filtro: Elemento que, interpuesto en un flujo, permite eliminar parte de los elementos de ese flujo, normalmente elementos no deseados.

Tratamiento de agua: Se trata de un conjunto de operaciones físicas, químicas o biológicas que tiene como objetivo mínimo la reducción y como propósito básico la eliminación de la contaminación y los residuos de las aguas.

Análisis físico-químico del agua: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

Análisis microbiológico del agua: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

Turbiedad: Falta de Claridad de un líquido, causada por las partículas suspendidas. Definido por la medida de dispersar la luz a través de una muestra. Se usan índices como FTU, NTU, etc. Es una propiedad óptica del agua que representa la cantidad de luz que refleja la materia en suspensión, cuando hacemos incidir sobre ella un haz de luz de una longitud de onda determinada. Es, por lo tanto, una estimación indirecta de la concentración de partículas en suspensión que se encuentran en el agua y las unidades empleadas para representar la turbidez son las Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU por sus siglas en inglés) (Göransson, Larson, & Bendz, 2013).

Color: El color es la falta de claridad del agua, esto se debe fundamentalmente, a diferentes sustancias coloreadas existentes en suspensión o disueltas en ella. En aguas naturales el color proviene de las numerosas materias orgánicas procedentes de la descomposición de vegetales, así como de diversos productos y metabolitos orgánicos que habitualmente se encuentran en ellas (colocaciones amarillentas). Además, la presencia de sales solubles de Fe y Mn también producen un cierto color en el agua.

Alcalinidad: Capacidad del agua para neutralizar los ácidos. Esta capacidad se origina en el contenido de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), hidróxidos (OH^-) y ocasionalmente boratos, silicatos y fosfatos. La alcalinidad se expresa en miligramos por litro de equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3). Según CEPIS, La alcalinidad es un parámetro básico en el tratamiento del agua. En primer lugar, se

necesita cierta concentración de alcalinidad para promover el proceso de coagulación con sales de aluminio o sales férricas.

Temperatura: La temperatura es un parámetro termodinámico del estado de un sistema que caracteriza el calor, o transferencia de energía. La temperatura del agua influirá en la cantidad de oxígeno presente en el agua ya que a mayor temperatura se acelerará el proceso fotosintético, así como la remoción de materia orgánica.

Coagulación: Se denomina coagulación al proceso de desestabilización, neutralizando las cargas eléctricas de las partículas en suspensión con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Zeta se anula y los coloides tienden a agregarse por acción de masas tienden a agregarse por acción de masas (F. Pérez & Urrea, 2016).

Floculación: La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico –flóculos (Restrepo, 2009).

Decantación: Consiste en promover condiciones de reposo en el agua, para que la mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas (Maldonado, 2004b).

Filtración: Consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso, normalmente de arena, en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión y del medio poroso (Maldonado, 2004a).

Optimización: Proceso de diseño y/o construcción para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes de un sistema o incrementar su

capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles (De Vargas, 2009).

Pruebas de jarras: La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala. La Prueba de Jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la operación llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas similares. Esta prueba se realiza con el fin de determinar la concentración óptima de coagulante necesaria para obtener un floc de las mejores características (De Vargas, 2009).

Gradientes de velocidad: Es definida como la potencia de movimiento o agitación transferida a un fluido, en tratamiento de aguas es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas (Hudson, 1965; Ordoñez & Paz, 2016).

Tiempos de floculación: La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras (De Vargas, 2009).

Método de superficie de respuesta: Es un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas que permite entender y observar mejor las variables respuesta diseñando una ecuación para asignar valores razonables a la variable respuesta y determinar un modelo matemático que se ajuste mejor a los datos obtenidos. La superficie de respuesta tiene como finalidad encontrar los datos de las variables independientes que optimicen el valor de la variable respuesta (Sánchez, 2011).

Diseño estadístico Box-Behnken: Es tipo diseño de superficie de respuesta diseñado para tres variables con tres niveles. Tienen menos puntos de diseño que los

diseños centrales compuestos normalmente usados, en efecto, su ejecución es menos costosa sin disminuir la fiabilidad de sus resultados. Los diseños de Box-Behnken a diferencia de los diseños centrales compuestos siempre tienen 3 niveles por factor y nunca realizan corridas donde todos los valores de los factores estén en sus niveles extremos (MINITAB, 2019).

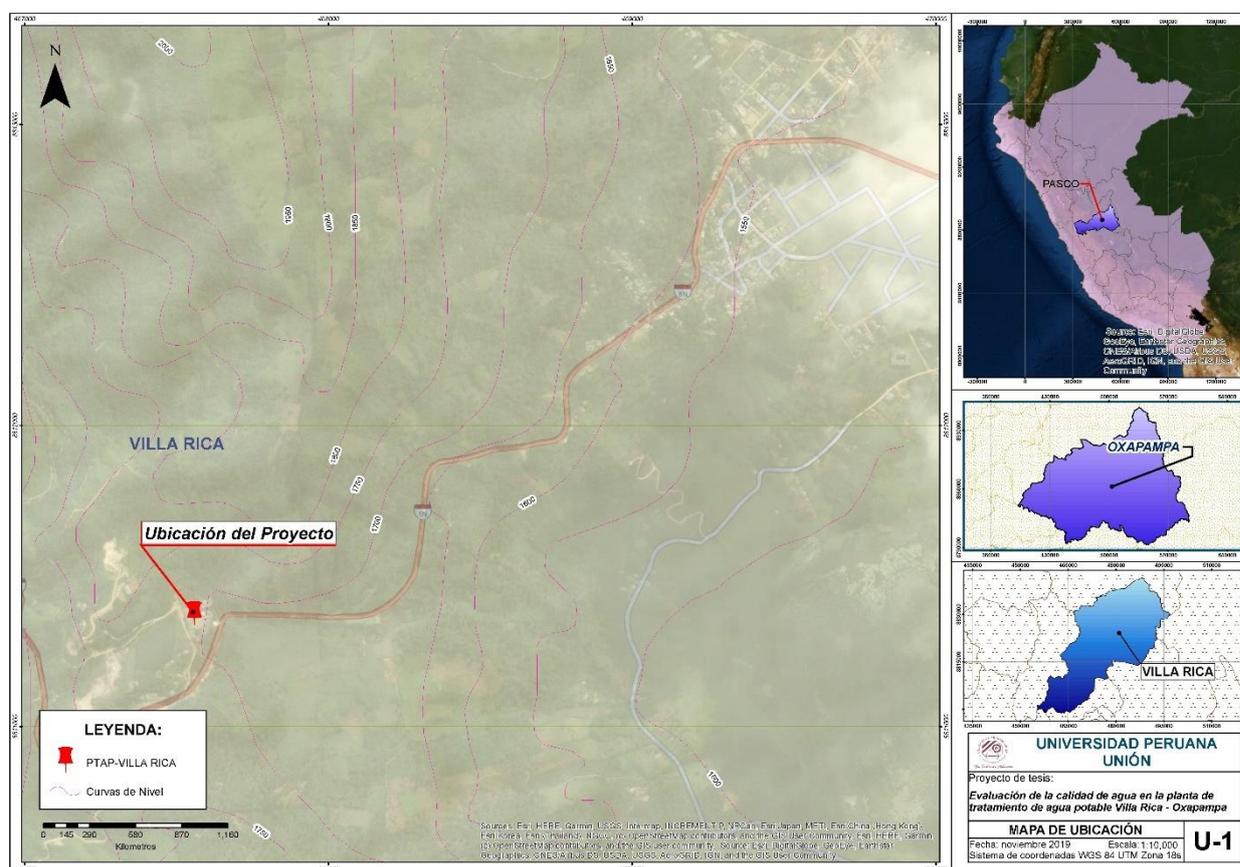
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de investigación

La planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica está situada en la región Pasco, provincia de Oxapampa y distrito de Villa Rica que se ubica a 1495 m.s.n.m. El distrito de villa rica tiene una superficie de 896.42 km² y la densidad poblacional es de 27.72 hab/km² (INEI, 2010). En la Figura 20 se visualiza el mapa de ubicación.

Figura 20.

Mapa de ubicación



Los monitoreos y análisis fueron realizados en el laboratorio propio de la PTAP, con la autorización del jefe de la planta de tratamiento de Villa Rica, la constancia de aprobación se presenta en el anexo 5. La PTAP se localiza a 15 minutos de la ciudad, ubicación geográfica y las coordenadas de la PTAP se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Ubicación geográfica del lugar de ejecución del proyecto

Lugar de ejecución del proyecto	Coordenadas geográficas UTM		
	Este	Norte	Elevación
	468963 m	8812521 m	1600 m.s.n.m.

Sistema Geodésico Mundial WGS84, zona 18 L

Fuente: Elaboración propia (2019)

Nota. Coordenadas geográficas en UTM del lugar de ejecución del proyecto obtenidos de Google Earth, 2019.

3.1.1. Clima

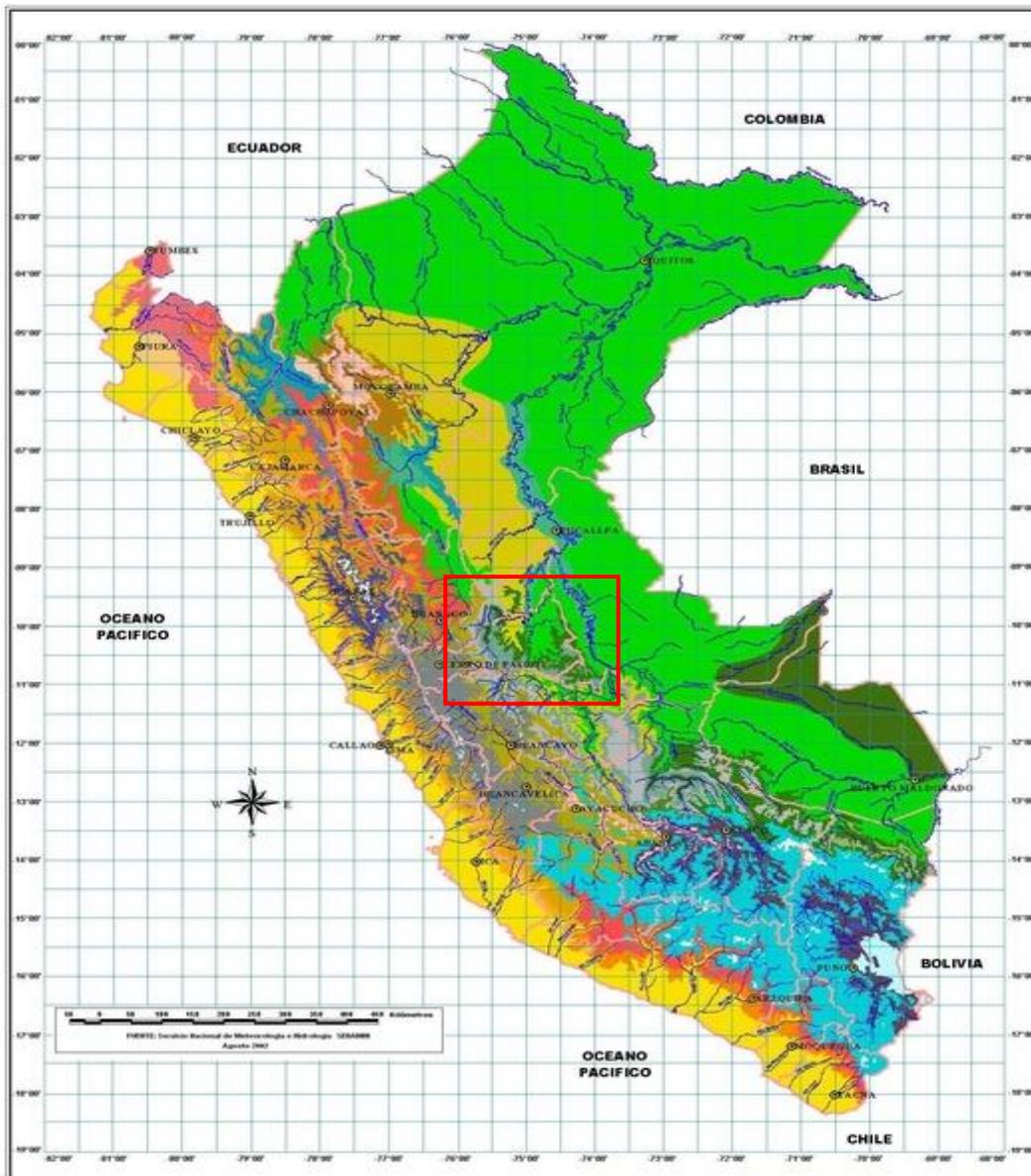
Perú cuenta con una gran diversidad de climas gracias a varios factores, de acuerdo a lo señalado por el SENAMHI (2019a) los principales son:

- Su ubicación en una zona intertropical.
- La cercanía a la cordillera de los andes y la corriente de Humboldt que recorre sus costas.

Debido la existencia de diversos climas en nuestro país, hacer una descripción climática expresada en gráficos es muy conveniente, por tal motivo el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), analizó y organizó la información meteorológica disponible de 20 años, formuló índices climáticos y delimitó las zonas climáticas de acuerdo a lo propuesto por el climatólogo Werren Thornthwaite. Según esta clasificación de climas, la zona donde se sitúa Villa Rica pertenece a la selva trópica húmeda, la Figura 21 presenta la clasificación de climas del Perú realizada por el SENAMHI y se señala la zona de Villa Rica en la región Pasco.

Figura 21.

Mapa climático nacional y zona de estudio SENAMHI (2019)



3.1.2. Generalidades de la planta.

La planta fue construida por el Gobierno Regional el año 2004 para tratar un caudal de 52 L/s, debido a que originalmente la planta presentaba problemas de pérdida de agua, tiempo de retención insuficiente y errores en el diseño en los filtros, la PTAP fue rehabilitada en el 2016.

Nombre de la planta : VILLA RICA
Entidad administradora : EPS Selva Central
Departamento : Pasco
Provincia : Oxapampa
Distrito : Villa Rica
Fuente de abastecimiento: : Río Ñagazú

3.1.2.1. **Fuente de abastecimiento de agua.** La PTAP de Villa Rica se abastece de las aguas del río Ñagazú ubicado a 6 km, de acuerdo a la clasificación de cuerpos de agua establecida por la Autoridad Nacional del Agua a través de la RJ-202-2010-ANA y GEO GPS Perú (2019) el Río Ñagazú pertenece a la cuenca del Perené, misma que corresponde a la región hidrográfica del Amazonas.

Figura 22.

Captación de agua del río Ñagazú



En la Figura 22 se muestra el río Ñagazú y la captación de agua que se realiza para ser transportada a la planta de tratamiento de agua potable.

Figura 23.

Válvulas de compuerta y canal de conducción del afluente



La Figura 23 muestra el canal de conducción de agua para el tratamiento y las válvulas de compuerta que se controlan manualmente para regular el caudal de agua que será transportado hacia la PTAP.

3.1.2.2. Tipo de planta. La planta de tratamiento de agua potable es de tipo filtración rápida completa con opción a filtración directa.

3.1.3. Componentes de la planta de tratamiento de agua potable

3.1.3.1. Almacén. Tiene una capacidad promedio de almacenar alrededor de 171 bolsas de 25 Kg para un periodo de 60 días, dichas bolsas son colocadas sobre tarimas de madera de 1,50 m por 1,50 m para almacenar, hasta una altura máxima de 1,80 m. La transferencia del sulfato de aluminio hacia la zona de dosificación se realiza de manera manual como muestra la Figura 24.

Figura 24.

Operador de la planta en el almacén



3.1.3.2. Medidor del caudal. Para medir el caudal la planta cuenta con un vertedero rectangular de ingreso, esta unidad recibe el agua cruda en una caja de ingreso a través de una tubería de PVC de 315 mm de diámetro. Dicha caja de ingreso en su parte más profunda es de 0,72 x 0.925 m y en su parte superior de 0,72 x 1,73

m de sección, seguida de una rampa de 0.39 m de alto, 0,72 m de ancho y 1,00 m de longitud.

La medición del caudal se efectúa en el vertedero que se forma en la coronación de la rampa. Utilizando una regla graduada en la caja de entrada en el lado opuesto al vertedero y con el 0 de la regla coincidiendo con el nivel del vertedero.

3.1.3.3. Mezcla rápida. Para la mezcla rápida, la planta cuenta con un canal es mezcla rápida del tipo vertedero rectangular, las características se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Resumen de características y parámetros de mezclador para las condiciones de operación.

Parámetro	Q=57 L/s
Nº Froude asumido	5.7
Nº Froude verificado	5.12
Gradiente de velocidad (S ⁻¹)	1218
Tiempo de mezcla (s)	1.88
Longitud de resalto (m)	1.17
Ancho de rampa (m)	0.72
Altura de rampa (m) *	0.39
Altura de agua en el vertedero (m)	0.12
Altura de la rampa (m)	0.39
Ancho (m)	0.72
Longitud (m)	1

En la Tabla 6. Se muestran los parámetros de operación y las dimensiones que presenta la unidad de mezcla rápida en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica.

3.1.3.4. Tubería de dosificación del coagulante. En el origen del resalto se ubica un tubo difusor de PVC NTP 399.166 Clase 10 de 1 ½” de diámetro con 20 agujeros, espaciados a 0.04 m centro a centro para aplicar la solución de sulfato de aluminio. La altura del agua en el vertedero que se forma en la coronación de la rampa será de 0.12 m para el caudal al final del periodo de diseño (57,00 L/s).

- Producto Químico: Sulfato de aluminio
- Tipo de dosificador: Por gravedad
- Numero de dosificadores: 1 und
- Punto de aplicación del coagulante: cercano al resalto hidráulico

En la Figura 25 se muestra la tubería de PVC NTP 399.166 Clase 10 de 1 ½” de diámetro para la dosificación de coagulante ubicada en la zona de mezcla rápida

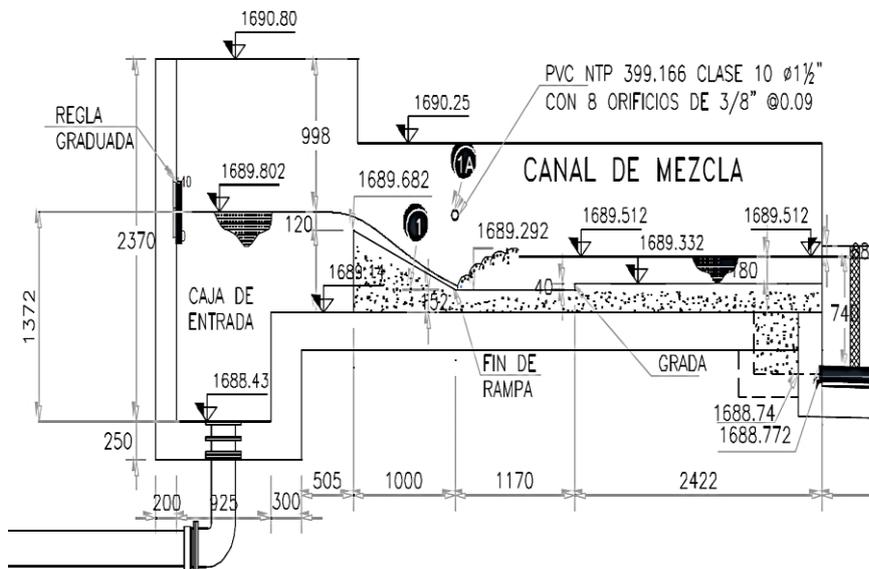
Figura 25.

Dosificación por gravedad



Figura 26.

Corte de la unidad de mezcla rápida



En la Figura 26 se observa una vista de corte de la unidad de mezcla rápida que posee la planta de tratamiento de villa rica los parámetros de operación son los que se muestran en la Tabla 6.

3.1.3.5. Floculadores. La PTAP de Villa Rica cuenta con una unidad de floculadores dividida en tres tramos, sus características son las siguientes:

- a) Tipo: hidráulico de pantallas de flujo horizontal
- b) Número de unidades: 1 unidad
- c) Número de tramos: 3
- d) Volumen de la unidad: 59 m³

Tabla 7.

Características y parámetros de operación considerado en el diseño del floculador

Tramo	Ancho de tramo	N° compartimientos	Pérdida de carga	Ancho en las vueltas	Q=57 L/s			
					G ópt (S ⁻¹)	G (S ⁻¹)	T (min)	
1	6	15	0.162	0.413	70	69	5.52	
2	6	15	0.091	0.525	50	50	5.96	
3	6.87	8	0.019	0.81	20	21	7.36	
Totales:								18.84

Los datos mostrados en la Tabla 7 corresponden a la información del último informe de consultoría “Reconstrucción de la infraestructura de saneamiento de Villa Rica-Oxapampa-Pasco” a cargo de CESEL INGENIEROS en el año 2013, sin embargo, la planta actualmente presenta parámetros de operación distintos, los cuales son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8.

Características y parámetros de operación actuales del floculador

Tramo	Ancho de tramo	Profundidad útil	N° compartimientos	Ancho en las vueltas	Q=57 L/s		
					G (S ⁻¹)	T (min)	
1	6	0.65	16	0.413	48	6.5	
2	6	0.725	14	0.525	26	9.5	
3	6.87	0.725	9	0.81	10	7	
Totales:							23

Según la EPS Selva Central este cambio se realizó con el fin de incrementar el tiempo de retención hidráulica y mejorar el porcentaje de remoción de color y turbidez, sin embargo, no se alcanzaron los resultados esperados.

En el fondo de floculador a la altura del segundo tramo se cuenta con una válvula de compuerta de hierro dúctil de 200 mm de diámetro. Esta válvula descarga hacia el canal de desagüe del módulo y es operada manualmente desde este canal. Esta válvula se usa solo para cuando se realiza la limpieza de la unidad.

Figura 27.

Floculadores con agua turbia



En la Figura 27 se muestra los tres tramos de los floculadores en su estado operativo durante el mes de enero.

3.1.3.6. Decantadores

- a) Tipo: Laminares
- b) Número de unidades: 4 und.
- c) Ancho: 1.57 m
- d) Largo: 2.96 m
- e) Área total: 36.4 m².

a. Canal de recolección de agua floculada. El canal recibe el efluente del último tramo del floculador y distribuye a las 4 cajas de ingreso de agua floculada a los decantadores, esta unidad presenta un ancho de 0.58 m, altura de 1.07 m y un largo total de 10.825 m.

b. Caja de ingreso a cada unidad. Son 4 cajas de ingreso con dimensiones de 0.69 m de ancho por 2,45 m de largo. La parte superior de esta caja

está protegida por rejas metálicas. Por la parte inferior de esta caja se distribuye agua floculada hacia las dos tuberías de PVC ISO 1452 Clase 10 de 500 mm de diámetro.

c. Tuberías de distribución de agua floculada. La distribución del agua floculada por debajo de las placas a lo largo de cada decantador se realiza por medio de dos tuberías de PVC ISO 1452 Clase 10 de 500 mm de diámetro. Cada tubería tiene una longitud de 3,86 m con nueve orificios de 90 mm de diámetro y con una separación de 0,40 m de centro a centro.

d. Zona de decantación. La planta opera con una tasa real de 28,2 m³/m² por día con el caudal total de 57.78 L/s. Cada unidad de decantación está constituida por un módulo de placas paralelas de 2.45 m de ancho y 3.86 m de largo, compuesto por 26 placas de 2.45 m de ancho, 1.20 m de longitud y 0.6 mm de espesor, inclinadas a 60°. Las placas son de vinilo reforzadas con hilos de poliéster de alta tenacidad (KP 1,000), recubiertas por ambos lados con PVC de formulación especial; con bastas en todo el contorno y cabos o refuerzos internos en los cuatro lados. Están provistas de pequeñas planchas de aluminio en las cuatro esquinas fijadas mediante pernos a los perfiles de aluminio ubicados en las paredes de los canales laterales, que sirven para tensar las vinilonas en sus cuatro esquinas. Los perfiles son de 90°, con orificios espaciados cada 12 cm. centro a centro.

Para la inspección y mantenimiento cuenta con un ingreso de 0,60 x 0,60 m hacia la tolva de lodos. En este ingreso cuenta con una escalera tipo gato con tubos de 1 ¼" de acero galvanizado.

e. Sistema de recolección de agua decantada. La recolección de agua se realiza por medio de tubos de PVC ISO 4422 de DN 200 mm clase 10 con orificios

de $\frac{3}{4}$ " a cada 0,15 m. Con dos tubos a lo largo de cada unidad. Las características de la zona de recolección de agua decantada se presentan en la Tabla 9

Tabla 9.

Características de la zona de recolección de agua decantada

Características	Unidades	Caudal Q=57 L/s
Longitud de recolección total	m	30.81
Tasa de recolección	L/s x min	1.85

f. Sistema de almacenamiento y extracción hidráulica de lodos. Cada unidad de decantación tiene un sistema que consiste en una tolva continua para el almacenamiento de lodos. La tolva tiene la forma de tronco de pirámide y un canal colector en su parte inferior. La tolva tiene una base menor de 0,50 m x 2,40 m de base mayor.

En la parte inferior de la tolva tiene un canal con una sección de 0,30x 0,30 m cubiertas con losas removibles de 0,50 x 0,50 m con orificios en su parte central de 2" de diámetro. Este canal permite extraer en forma uniforme y simultánea el lodo de la tolva al abrir la válvula mariposa de salida de 300 mm de diámetro instalada en su extremo operando con una carga hidráulica de 3,90 m. Los lodos evacuados de estas unidades se conducirán por gravedad hacia los lechos de secado.

3.1.3.7. Batería de filtros. La batería de filtros cuenta con dos medios filtrantes (arena y antracita), lecho de soporte, viguetas prefabricadas, válvulas de mariposa de entrada y desagüe, válvulas de compuerta en canal de aislamiento, vertedero de control de la hidráulica de lavado, vertedero de rebose y válvula de compuerta de 100 mm para el drenaje de las unidades.

La tasa promedio de operación, tasa de lavado, carga de lavado y carga hidráulica para la filtración, para el caudal de operación de 57 L/s se indica en el cuadro siguiente.

- Tipo: Batería de 6 filtros de tasa declinante
- Tipo de lecho filtrante: Doble arena y antracita
- Área de filtración: 27.88 m²
- Tasa de filtración promedio: 179.07 m³/m²/d.

La batería de filtros está conformada por 6 filtros con un área de cada filtro de 3,77 m² y un área total de 22,59 m². Los parámetros de operación del filtro se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.

Parámetros de operación del filtro en función al caudal

Parámetros operacionales	Caudal (L/s) 57.0
Tasa de filtración (m ³ /m ² . d)	218
Velocidad de lavado (m/min)	0.908
Carga de lavado (m)	0.61
Expansión promedio (%)	30
Expansión hidráulica filtración (m)	0.43
Borde libre	1.32
Altura total del filtro (m)	5.165

La carga hidráulica para el lavado se regula a través del vertedero de control (L= 1,20 m de longitud) y la carga hidráulica de filtración se regula a través del vertedero de rebose (L = 0,80 m de longitud). Ambos vertederos, el de control y de rebose son regulables.

El lecho filtrante, es un medio doble de arena (0.30 m) y antracita de (0.80 m) de espesor y de las características indicadas en la Tabla 11.

Tabla 11.*Características del medio filtrante*

Parámetro	Tamaño	
	Arena	Antracita
D60 (mm)	1,05	1,65
Tamaño mínimo (mm)	0,59	0,83
Tamaño máximo (mm)	1,65	2,83
Coefficiente de uniformidad (C.U.)	1,4	1,47
Peso específico de la arena g/cc	2,65	1,5

El drenaje considerado en los filtros es de viguetas de concreto prefabricadas de 0.30 m de lado y 0.26 m de alto. Las viguetas tienen 15 orificios de $\frac{3}{4}$ " a cada lado con separaciones a cada 0,10 m.

La distribución de tamaños y alturas de la capa de soporte apropiadas a este tipo de drenaje se indican en la Tabla 12.

Tabla 12.*Especificaciones de la capa soporte de grava para viguetas prefabricadas.*

Capa	Espesor (cm)	Tamaño (Pulgada)
1	7.5	$\frac{1}{8}$ " - $\frac{1}{4}$ "
2	7.5	$\frac{1}{4}$ " - $\frac{1}{2}$ "
3	7.5	$\frac{1}{2}$ " - $\frac{3}{4}$ "
4	10.0	$\frac{3}{4}$ " - $1\frac{1}{2}$ "
Fondo	12.5	$1\frac{1}{2}$ " - 2"
Total	45.0	

La batería de filtros tiene un canal de distribución de agua decantada de 0,80 m de ancho. Con válvulas de mariposa de 150 mm de diámetro de entrada de agua decantada a cada filtro. En este canal está ubicado el aliviadero de control de nivel máximo de operación (rebose) de los filtros. El canal con un aliviadero (vertedero regulable) de 0,80 m de longitud. Debajo de este canal se encuentra el canal de desagüe del módulo, donde se recibe el agua de lavado de los filtros. La descarga de agua de retrolavado se efectúa mediante válvulas tipo mariposa de 250 mm de

diámetro. A este mismo canal se descargan también los lodos de los decantadores a través de una válvula de mariposa de 300 mm de diámetro.

Cada filtro tiene un canal de aislamiento de 0,70 m de ancho, el cual se comunica con el canal de interconexión de la batería mediante una válvula de compuerta de hierro dúctil de 250 mm. En un extremo del canal de interconexión se encuentra un vertedero de 1,20 m de ancho el cual proporciona la carga hidráulica para la operación de lavado. Este vertedero es graduable con el fin de poder instalar la carga hidráulica de lavado necesaria de acuerdo al caudal de operación. En la Tabla 13 se indican las características de los vertederos que operan para un caudal de 57 L/s.

Tabla 13.

Medidas y cotas del vertedero de lavado y el de aliviadero

Etapa	Vertedero control de lavado		Vertedero de aliviadero	
	Longitud (m)	Cota (m)	Longitud (m)	Cota (m)
57 L/s	1,20	1688,23	0,80	1678.80

Figura 28.

Vertedero de lavado de los filtros



Nota. Vista fotográfica del vertedero paraa el lavado de los filtros.

3.1.3.8. Caseta de cloración

a. Almacenamiento. En la caseta se almacena cilindros de cloro de 150 Libras. La capacidad de almacenamiento es de 11 cilindros incluyendo al que está en uso y al que está en espera. Los cilindros vacíos y llenos se ubican pegados a la pared y sujetos a la pared a través de una cadena para evitar el volcamiento.

b. Equipos de cloración. La planta cuenta con dos cloradores del tipo de alimentación directa de funcionamiento alterno de 50 Lb/día de capacidad de montaje en la pared. Para el control del peso de los cilindros de cloro de 150 Libras de capacidad de almacenamiento la planta cuenta con dos balanzas de 150 Kg de capacidad de carga, una en cada una de las dos líneas de cloración. Sobre cada balanza se instala un cilindro de cloro. La otra balanza con el otro cilindro de cloro entra en funcionamiento cuando el otro esté vacío. Esta configuración de instalación garantiza un suministro permanente de cloro.

- Tipo de dosificador: Clorador de aplicación directa

- Número de cilindros: 1 und (67 Kg)

- Punto de aplicación: El punto de aplicación del gas cloro será inmediatamente antes del vertedero de control y se realizará a través de un difusor microporoso.

3.1.3.9. Red de agua para limpieza. Para realizar la limpieza de las unidades, la planta cuenta con una línea de agua con tubería de PVC de 3" de diámetro, clase 10 que se alimenta del tanque elevado hasta las salidas a través de dos gabinetes del tipo contra incendios. En este gabinete dispone de una manguera de 2 ½" de 30 m de longitud.

3.1.3.10. Lechos de secado. La planta cuenta con un sistema de dos lechos de secado de funcionamiento alternado para el secado de lodos provenientes de la purga de los sedimentadores, agua de lavado de filtros, purga de decantadores y de lavado de unidades.

Los lodos de cada una de estas unidades se conducen por gravedad hacia los lechos de secado. Igualmente, el percolado de los lechos de secado para ser evacuados por gravedad hacia quebrada aledaña.

Ambos lechos de secado tienen un espejo de agua de 13,00 x 8,50 m, con una altura máxima de agua de 0,50 m. Considerando que la zona es lluviosa, ambos tienen una cobertura.

3.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y empírica, ya que, a diferencia de la investigación básica, busca aplicar los conocimientos adquiridos mientras se adquieren otros (Lozada, 2014). De acuerdo a Rojas (2015) el estudio es de investigación aplicada por el propósito o finalidad para el cual fue empleado.

3.3. Diseño de la investigación

El estudio es un diseño experimental dado que las variables de estudio han sido controladas. Se realizaron pruebas de laboratorio y se emplearon criterios de cálculo para las unidades de la planta de tratamiento de agua potable (Vallejo, 2002).

3.4. Materiales y equipos

Los materiales, equipos e insumos químicos que se serán empleados para la evaluación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Villa Rica se presentan en la Tabla 14, asimismo, los insumos químicos son mostrados en la Tabla 15.

Tabla 14.

Equipos, materiales e insumos empleados en la evaluación

Equipos y materiales	Equipo	Material	Cantidad
Equipo de prueba de jarras PHIPPS&BIRD	x		1 Und
pH metro HANNA	x		1 Und
Conductímetro HANNA	x		1 Und
Colorímetro portátil Hach DR900	x		1 Und
Balanza electrónica POCKET SCALE	x		1 Und
Pipetas de 10 ml		x	3 Und
Pipetas de 1 ml		x	3 Und
Pipeteador		x	2 Und
Vaso precipitado de 2000 ml		x	6 Und
Vaso precipitado de 50 ml		x	2 Und
Jeringas 10 ml		x	6 Und
Jeringas 5 ml		x	6 Und
Sifones		x	6 und
Fiola 50 ml		x	2 Und
Matraz 50 ml		x	1 Und
Cronómetro		x	1 Und
Probeta de 1000 ml		x	1 Und
Baldes de 20 L		x	4 Und
Tanques de agua de 220 L		x	2 Und
Papel filtro		x	1 caja

Tabla 15.

Insumos químicos aplicados en las pruebas de tratabilidad

Insumo químico	Características	
Sulfato de aluminio en solución al 8%	Fórmula Química	$Al_2(SO_4)_3$
	Aspecto	Líquido pardo Amarillento
	Concentración de Oxido de Aluminio	7.9 a 8.3 como % Al_2O_3
	Basicidad (% Al_2O_3 libre)	No mayor de 0.2
	Fierro Total (% Fe_2O_3)	No mayor de 0.35
	Residuo Insoluble (%)	No mayor de 1%
	Densidad	1.3 a 1.35 g/cc.
Sulfato de aluminio granulado Tipo A	Fórmula Química	$Al_2(SO_4)_3$
	Aspecto	Sólido blanco granulado, soluble en agua.
	Concentración de Oxido de Aluminio	No menor a 17.0
	Basicidad (% Al_2O_3 libre)	No mayor a 0.60
	Fierro Total (% Fe_2O_3)	No mayor a 0.05
Cloruro férrico al 40%	Fórmula Química	$FeCl_3$
	Aspecto	Líquido pardo oscuro

Insumo químico	Características	
	Concentración de Oxido de Aluminio	38 a 45% como % FeCl ₃
	Basicidad (% Al ₂ O ₃ libre)	No mayor de 0.5% como FeCl ₂
	Fierro Total (% Fe ₂ O ₃)	No mayor de 0.01%
	Residuo Insoluble (%)	No mayor de 0.5%
	Densidad	1.4 a 1.45 g/cc.
Policloruro de Aluminio (PAC)	Fórmula Química	Al ₂ (OH) ₃ Cl
	Aspecto	Líquido ámbar
	Concentración de Oxido de Aluminio	17,5 +/- 0,5
	Densidad	1.36 – 1.41 gr/ml
Polímero catiónico	Fórmula Química	
	Aspecto	Líquido pardo Amarillento
	Concentración de Oxido de Aluminio	
	Densidad	
Anaranjado de metilo	Aspecto	Solución de color naranja
	Solubilidad en el agua	400g/l (20°C)
	Densidad	1.14g/cm ³ (25°C)
Ácido sulfúrico 0.02 N	Fórmula Química	H ₂ SO ₄
	Aspecto	Líquido amarillento
	Densidad	1.01 g/cm ³ (20 °C)
Ácido nítrico	Fórmula Química	HNO ₃
	Aspecto	Líquido incoloro
	Densidad	1,5129 g/cm ³
Agua destilada	Fórmula Química	H ₂ O
	Aspecto	Líquido incoloro

Figura 29.

Insumos químicos empleados en las pruebas de laboratorio



Figura 30.

Equipo de prueba de jarras empleado en las pruebas de tratabilidad



En la Figura 29 se observan los insumos químicos empleados en las pruebas de tratabilidad y en la Figura 30 se aprecia el equipo de prueba de jarras con el que cuenta el laboratorio de la PTAP de Villa Rica.

3.5. Procedimientos

El criterio empleado para el orden de los procedimientos de la siguiente investigación se estableció de acuerdo a la revisión bibliográfica e investigaciones relacionadas al tema realizadas anteriormente. Con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos, se realizó el estudio de la siguiente manera:

3.5.1. Descripción del flujograma

3.5.1.1. Caracterización del agua. Como primera actividad, para caracterizar la calidad de agua a tratar se realizó la medición de color, turbidez, pH, conductividad y alcalinidad del agua en la zona de entrada de la planta, a la salida de cada decantador y a la salida de la batería de filtros, la caracterización se realizó en enero, siendo el mes más crítico por las elevadas precipitaciones y altos niveles de turbidez y color.

3.5.1.2. Pruebas de tratabilidad para determinar tipo de coagulante.

Seguidamente se procedió a realizar en laboratorio las pruebas de tratabilidad con diferentes insumos químicos para determinar el tipo de coagulante adecuado que permita lograr la mayor reducción de color y turbidez para cada muestra de agua.

3.5.1.3. Pruebas de tratabilidad para determinar dosis óptimas de coagulante. Una vez determinado el tipo de coagulante que tiene la mayor eficiencia en la reducción de color y turbidez del agua, se realizaron pruebas de laboratorio empleando distintas dosis del coagulante óptimo con el fin de determinar cuál es las dosis óptimas con las que se logra la mayor reducción de los niveles de turbidez y color en el agua.

3.5.1.4. Pruebas de tratabilidad a diferentes niveles de pH. A continuación, se realizaron pruebas de tratabilidad con distintos niveles de pH del agua para lo cual se modificó el pH. Se realizaron pruebas en el laboratorio empleando el tipo coagulante y su respectiva dosis optima empleando muestras de agua con el pH modificado para determinar su influencia en el proceso de coagulación y floculación.

3.5.1.5. Pruebas de tratabilidad con polímero catiónico. Se realizaron las pruebas con el fin de determinar si su efecto es significativo en la remoción de color y turbidez, es necesario su uso, se realizaron pruebas de tratabilidad con polímero catiónico.

3.5.1.6. Pruebas de tratabilidad con diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad. Una vez determinado el coagulante adecuado y su dosis óptima, así como descartada la influencia del pH y el uso de polímero como ayudante

de coagulación y floculación se procedió a realizar pruebas de tratabilidad con diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad.

3.5.1.7. Pruebas de tratabilidad para determinar la tasa de decantación. Se realizaron pruebas de tratabilidad para estimar la tasa de decantación.

3.5.1.8. Método de superficie de respuesta. Una vez obtenidos los mejores niveles para la dosis de coagulante, tiempo de retención y gradiente de velocidad, el método de superficie de respuesta se emplea para optimizar el proceso de tratamiento de agua, asegurar una mejor calidad y reducir costos.

3.5.1.9. Evaluación de las unidades de tratamiento de la planta. A continuación, se procedió a observar los parámetros de operación actual de la planta y la verificación del funcionamiento de cada una de las unidades tomando en cuenta los criterios establecidos en la bibliografía. Se evaluó las siguientes unidades de tratamiento.

a. Mezclador. Se evaluó la unidad de mezcla rápida de acuerdo a los parámetros de diseño y recomendaciones del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales y la O.S. 020 del Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento del Perú.

b. Floculadores. Para evaluación de las distintas unidades de floculación se consideraron los parámetros y recomendaciones generales de diseño del CEPIS y lo que está establecido en la O.S. 020 del MVCS.

c. Decantadores. De la misma manera se observaron los parámetros y recomendaciones generales de diseño del CEPIS y el MVCS.

d. **Batería de filtros.** Se consideraron los criterios generales de diseño brindados por el CEPIS y la O.S. 020 del MVCS. para la observación y medición en campo.

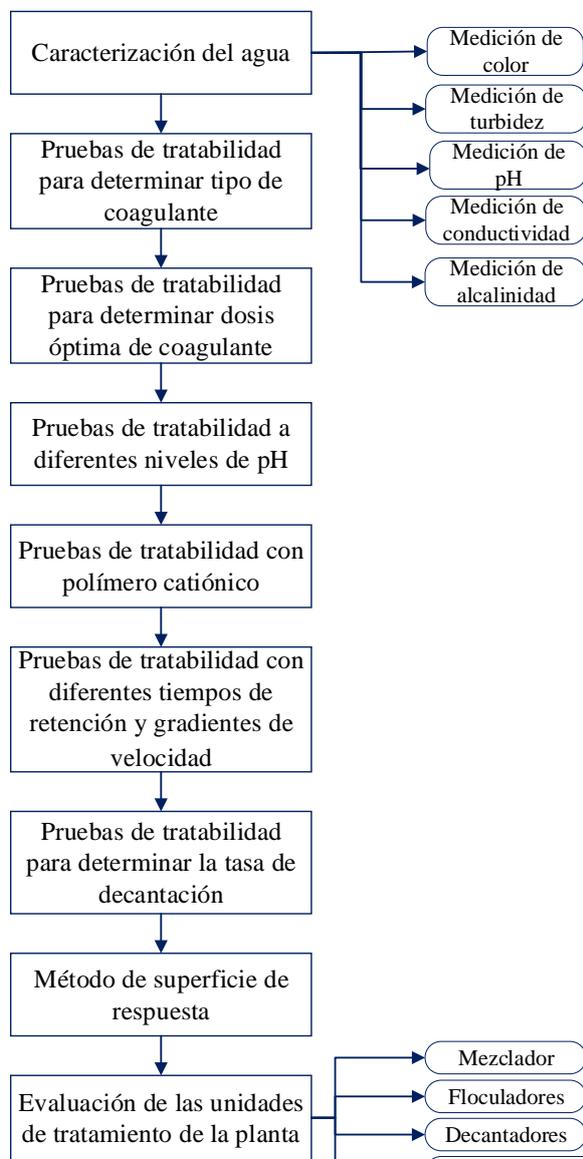
3.5.1.10. Diseño de planta con parámetros obtenidos en laboratorio.

Para el diseño de las unidades de tratamiento se emplearon las recomendaciones generales y los criterios de diseño descritos en el Manual II: Diseño de plantas de tecnología aplicada publicado por el CEPIS el 2006, asimismo se desarrollaron las ecuaciones establecidas para cada unidad de tratamiento y así como sus ecuaciones de verificación.

3.5.2. Flujograma

Figura 31.

Flujograma del proyecto



3.6. Análisis de datos

3.6.1. *Determinación de la temperatura ambiente*

Se obtuvo data del monitoreo de temperatura realizado por el SENAMHI de los años 2018 y 2019 a través de su portal web, seguidamente con el uso de la herramienta “Promedio” del software Microsoft Excel se determinó la temperatura máxima, mínima y promedio mensual con además se elaboró un gráfico para representar la variación de la temperatura ambiente durante el año.

3.6.2. *Determinación de la precipitación en Villa Rica*

Empleando la data de monitoreo del SENAMHI que se obtuvo de su portal web se procedió a procesarla en el software Microsoft Excel para obtener el promedio mensual de precipitación de los años 2018 y 2019. Seguidamente se representaron los datos obtenidos de manera gráfica.

3.6.3. *Estimación de la población y la demanda de agua potable*

Se obtuvo la tasa de crecimiento de los reportes del último censo presentado por el INEI, así como los datos de población de años anteriores, asimismo se tomó del PMO de la EPS Selva Central; la cobertura del servicio de agua potable de la planta de Villa Rica que está representada por el porcentaje de población servida. Se logró estimar la población futura, así como la demanda de agua de la siguiente manera:

a. **Cálculo de la población futura.** Para el cálculo de la población futura se aplicó la siguiente ecuación:

$$Pf = Po(1 + r)^t$$

Donde:

Po = Población inicial

r = Tasa de crecimiento población

t= Tiempo de estimación (años)

b. **Cálculo de la población servida.** Para calcular la población servida se tomó en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{Población servida} = Pt * \text{cobertura de agua}$$

Donde:

Pt = Población total

Cobertura de agua= Establecido por el PMO Selva Central

c. **Cálculo del caudal promedio** Para calcular el caudal promedio de tratamiento con el que operará la planta de tratamiento se empleó la siguiente ecuación.

$$Q_{prom.} = Ps * \text{Dotación}$$

Donde:

Ps = Población servida

Dotación= Para climas cálidos 220 l/hab/día. Considerado por la OS 100

d. **Cálculo del caudal máximo diario.** El caudal máximo diario se calcula multiplicando la población servida por la dotación. La Norma OS. 100 establece que adicionalmente se debe considerar coeficiente de variación de consumo de 1.3 como se observa en la siguiente ecuación.

$$Q_{m\acute{a}x. \text{ diario. a\~{n}o}} = Ps * \text{Dotación} * 1.3$$

e. **Cálculo del caudal del diseño de la planta.** El caudal de diseño se calcula multiplicando el caudal máximo diario más un 5% para compensar gastos de

lavado de los filtros y pérdidas en la remoción de lodos de acuerdo a la Norma OS. 020 como se observa en la siguiente ecuación.

$$Q_{\text{diseño}} = Q_{\text{máx. diario. año}} + 5\%$$

3.6.4. Determinación de la calidad de agua en el afluente y efluente

Se realizaron monitoreos de calidad de agua en el afluente y efluente de la planta de tratamiento por la EPS Selva Central.

3.6.5. Control del caudal y volumen tratado de la planta

Se midió el caudal de ingreso de agua en el canal con cambio pendiente durante el mes de enero. El canal con cambio de pendiente dispone de una regla en la sección lateral que permite estimar el caudal de ingreso a la planta en litros por segundo. Respecto al volumen se determinó el volumen de agua tratado por día y por mes usando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{V \text{ tratado}}{\text{día}} = Q_{\text{ingreso}} * 86400 \rightarrow \frac{V \text{ tratado}}{\text{mes}} = \left(\frac{V \text{ tratado}}{\text{día}} \right) * 30$$

3.6.6. Monitoreo de turbidez del agua

Se procesó la información de los valores de turbidez del afluente de los años 2016 y 2017 entregada por la EPS Selva Central en el software Microsoft Excel, adicionalmente se tomaron muestras de agua para registrar los niveles de turbidez con frecuencia de dos horas durante el mes de enero, dicho monitoreo se realizó desde el cuatro de enero hasta el dos de febrero, los puntos de monitoreo fueron en la entrada de la planta de tratamiento de agua antes del canal con cambio de pendiente, a la salida de los cuatro decantadores y a la salida de la unidad de filtración. Los resultados se registraron en el formato de monitoreo mostrado en el anexo 3. La medición se realizó con el Turbidímetro HANNA HI 93703.

Figura 32.

Turbidímetro empleado en las pruebas de tratabilidad



3.6.7. Monitoreo de color del agua

Se tomaron muestras de agua para registrar los niveles de color con una frecuencia de 2 horas, dicho monitoreo empezó el cuatro de enero hasta el dos de febrero, los puntos de monitoreo fueron en la entrada de la planta de tratamiento de agua antes del canal con cambio de pendiente, a la salida de los cuatro decantadores y a la salida de la unidad de filtración.

La medición de color aparente y real se realizó con el uso del equipo Colorímetro HACH DR 900. Los resultados se registraron en el formato de monitoreo mostrado en el anexo 3.

Figura 33.

Colorímetro empleado en las pruebas de tratabilidad



3.6.8. Monitoreo de la temperatura del afluente de agua

Se monitoreó la temperatura del agua cruda que ingresa a la planta con un intervalo de dos horas dicho monitoreo empezó el cuatro de enero hasta el dos de febrero. Los resultados se registraron en el formato de monitoreo mostrado en el anexo 3.

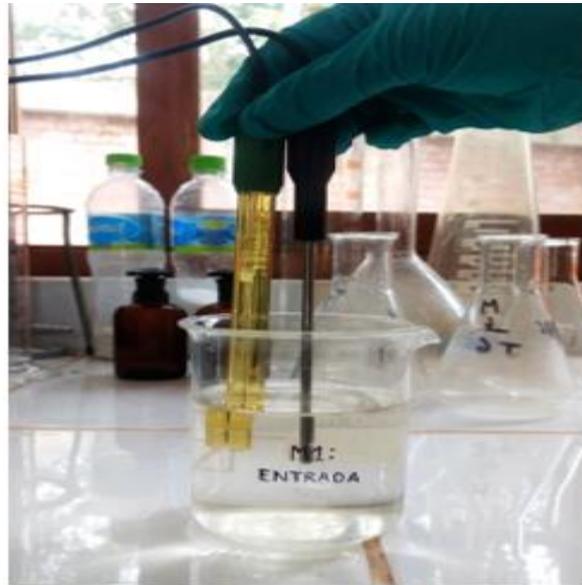
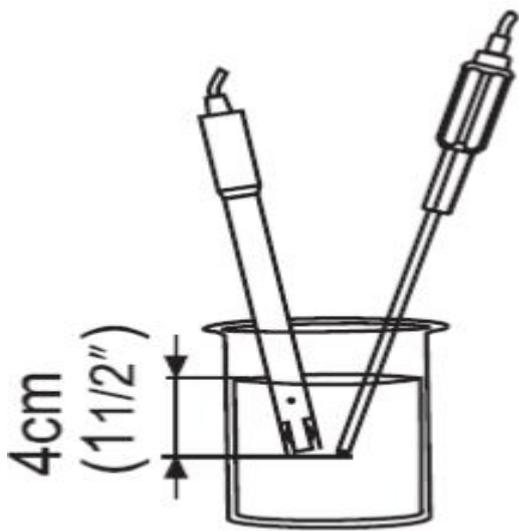
La medición se realizó con pH metro HANNA HI 9124 el cual nos mide pH y temperatura del agua.

3.6.9. Monitoreo del pH del agua

Se tomaron muestras de agua para registrar los niveles de pH con una frecuencia de 2 horas en el monitoreo del cuatro de enero al dos de febrero, los puntos de monitoreo fueron en la entrada de la planta de tratamiento de agua antes del canal con cambio de pendiente, a la salida de los cuatro decantadores y a la salida de la unidad de filtración. La medición se realizó con pH metro HANNA HI 9124

Figura 34.

pH metro empleado en las pruebas de tratabilidad



3.6.10. Monitoreo de la conductividad del agua

Se tomaron muestras de agua para registrar la conductividad con una frecuencia de dos horas, en monitoreo llevado a cabo entre el cuatro de enero y el dos de febrero del presente año, los puntos de monitoreo fueron en la entrada de la planta de tratamiento de agua antes del canal con cambio de pendiente y a la salida de la unidad de filtración. Los resultados se registraron en el formato de monitoreo mostrado en el anexo 3.

Figura 35.

Medición de los parámetros en laboratorio



3.6.11. Monitoreo de la alcalinidad del agua

Se tomaron muestras de agua para registrar la alcalinidad del agua en la entrada de la planta de tratamiento con una frecuencia de dos horas, en monitoreo fue llevado a cabo entre el cuatro de enero y el dos de febrero del presente año. Los resultados se registraron en el formato de monitoreo mostrado en el anexo 3

La medición de la alcalinidad se realizó por técnica titulométrica donde se valoró una muestra de 25 mL empleando un indicador (anaranjado de metilo) y se tituló con ácido sulfúrico 0.02. Se determinó el volumen de ácido gastado y se calculó la alcalinidad de la muestra de acuerdo a la fórmula

$$\text{Alcalinidad como mg CaCO}_3/\text{L} = A * 1000 \text{ L} / V_{\text{muestra}}$$

Donde:

A: mL de ácido sulfúrico gastado en la titulación

N: Normalidad del ácido sulfúrico

V: mL de la muestra

Figura 36.

Monitoreo de alcalinidad



3.6.12. Pruebas de tratabilidad para determinar el coagulante y dosis óptima.

Para esta prueba de laboratorio se comparó la eficiencia de remoción de turbidez y color de cuatro tipos de coagulantes, las pruebas se realizaron con los tiempos de floculación y gradientes de velocidad de la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica. Los coagulantes que se emplearon se mencionan en la Tabla 16.

Tabla 16.

Coagulantes químicos usados en la planta de tratamiento de agua potable

Coagulantes químicos
Sulfato de Aluminio granulado Tipo A
Sulfato de Aluminio Tipo A en solución al 8%
Cloruro Férrico
Policloruro de Aluminio

Se realizaron las pruebas con dos muestras representativas para obtener resultados más confiables. La primera muestra corresponde a agua con turbidez de 23 UNT y la segunda muestra de agua tuvo una turbidez de 453 UNT.

3.6.12.1. **Sulfato de aluminio granulado tipo A.** El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se preparó la solución de Sulfato de Aluminio tipo A granulado al 2.5%
- Se programó el equipo de prueba de jarras con el tiempo y las RPM correspondiente a las gradientes de velocidad con los que trabaja la PTAP
- Se acondicionaron las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente
- Se aplicaron dosis diferentes a cada jarra para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación). Las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 453 UNT fueron (35 mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L, 50 mg/L, 55 mg/L y 60 mg/L) y las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 23 fueron (10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L, 25 mg/L, 30 mg/L, 35 mg/L) no fueron necesarios la aplicación de más dosis puesto que todos cumplieron las curvas deseadas en los resultados con turbidez final.

Figura 37.

Equipo de prueba de jarras configurado para la prueba



3.6.12.2. Sulfato de aluminio Tipo A en solución al 8 %

- Se preparó la solución de Sulfato de Aluminio a una concentración de 2.5%
- Sé programo el equipo de prueba de jarras con gradientes y tiempos reales con los que trabaja la PTAP
- Se condicionaron las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente
- Se aplicaron dosis diferentes a cada jarra para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- Las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 453 UNT fueron (35 mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L, 50 mg/L, 55 mg/L y 60 mg/L) y las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 23 fueron (10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L, 25 mg/L, 30 mg/L, 35 mg/L) no fueron necesarios la aplicación de más dosis puesto que todos cumplieron las curvas deseadas en los resultados con turbidez final.

3.6.12.3. Cloruro férrico

- Se preparó la solución de cloruro férrico en solución al 2.5%
- Sé programo el equipo de prueba de jarras con gradientes y tiempos reales con los que trabaja la PTAP
- Se condicionaron las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente
- Se aplicaron dosis diferentes a cada jarra para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- Las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 453 UNT fueron (35 mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L, 50 mg/L, 55 mg/L y 60 mg/L) y las dosis aplicadas para la muestra

con turbidez de 23 fueron (10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L, 25 mg/L, 30 mg/L, 35 mg/L) no fueron necesarios la aplicación de más dosis puesto que todos cumplieron las curvas deseadas en los resultados con turbidez final.

3.6.12.4. Policloruro de aluminio PAC

- Se preparó la solución de policloruro de aluminio (PAC) al 2.5%
- Sé programo el equipo de prueba de jarras con gradientes y tiempos reales con los que trabaja la PTAP
- Se condicionaron las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente
- Se aplicaron dosis diferentes a cada jarra para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- Las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 453 UNT fueron (35 mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L, 50 mg/L, 55 mg/L y 60 mg/L) y las dosis aplicadas para la muestra con turbidez de 23 fueron (10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L, 25 mg/L, 30 mg/L, 35 mg/L) no fueron necesarios la aplicación de más dosis puesto que todos cumplieron las curvas deseadas en los resultados con turbidez final.
- Con los resultados obtenidos de cada uno de los coagulantes hacer una gráfica general para comparar los resultados y determinar al coagulante más efectivo.

Figura 38.

Prueba de jarras para determinar el coagulante y dosis óptima



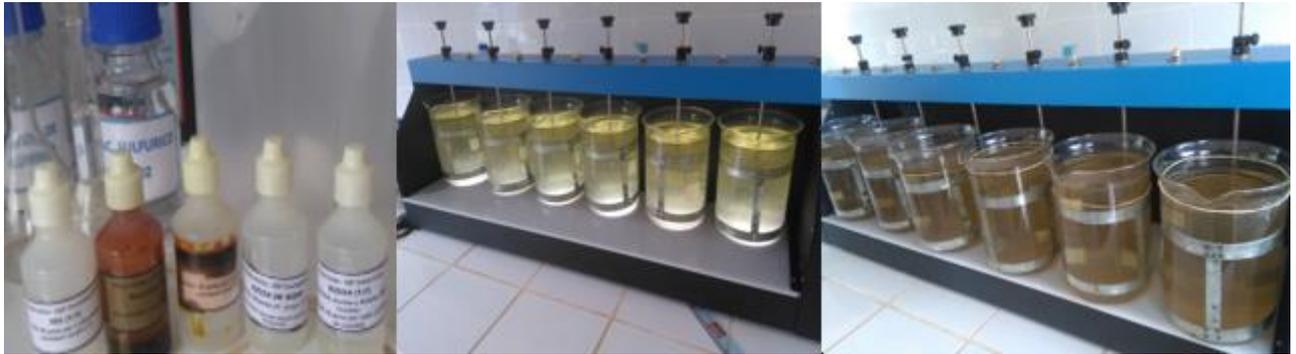
3.6.13. Pruebas de tratabilidad con diferentes niveles de pH.

Para conocer la influencia del pH en el tratamiento de agua se realizaron pruebas con el coagulante más efectivo determinado en las pruebas anteriores.

- Se preparó la solución del coagulante más óptimo (Sulfato de aluminio tipo A granulado al 2.5%).
- Se programó el equipo de pruebas de jarras con los gradientes y tiempos con los que trabaja la PTAP
- Acondicionar las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente
- Se modificó el pH a cada una de las jarras empleando ácido nítrico (HNO_3) (Jarra N°1: 4.5, Jarra N°2: 5, Jarra N°3: 5.5, Jarra N°4: 6, Jarra N° 5: 6.5 y Jarra N°6: pH natural del agua).
- Se aplicó la dosis óptima del **coagulante** hallado en las pruebas anteriores 30 mg/L para una muestra de 23 UNT para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- Se registraron los resultados de turbidez, color aparente, color real, y Aluminio residual).
- Se registraron los resultados de turbidez y color respecto a pH para ese tipo de agua.

Figura 39.

Pruebas de tratabilidad con diferentes niveles de pH



3.6.14. Pruebas de tratabilidad con polímero catiónico

- Se realizaron pruebas de tratabilidad con polímero catiónico de dos maneras como ayudante de coagulación y como ayudante de floculación.
- Para determinar la concentración del polímero fue necesario pesar una gota de polímero posteriormente agregar agua destilada hasta completar los 100 ml. El peso determinado de polímero indica la concentración de la solución.

3.6.14.1. Prueba de tratabilidad con polímero como ayudante de coagulación

- Se acondicionó la muestra de agua con turbidez de 453 UNT en los 6 vasos precipitados
- Se preparó la solución del polímero a la concentración definida por el peso (0.025%).
- Se programó el equipo de pruebas de jarras con los gradientes y tiempos reales de la PTAP
- Se acondicionaron las 6 jarras del equipo con la muestra correspondiente

- Se prepararon dosis diferentes de polímero para cada jarra (0.05 mg/L, 0.10 mg/L, 0.15 mg/L, 0.20 mg/L, 0.25 mg/L, 0.30 mg/L) no fue necesario aplicar más dosis dado que los resultados respecto a turbidez cumplieron con la curva esperada.

Tomando como referencia el criterio de Andía (2000) el polímero catiónico se aplicó en dosis de 0.05 a 0.35 mg/L, rango óptimo para mejorar la separación de los flóculos y evitar residuales.

- Se aplicó la mitad de la dosis optima del coagulante hallado en las pruebas anteriores de coagulante y dosis optima (Sulfato de Aluminio granulado Tipo A = 30mg/L) para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- Se aplicó el polímero y el coagulante de manera instantánea.
- Una vez determinada la dosis optima de polímero se realiza el mismo procedimiento para establecer la dosis optima del coagulante.
- Se aplicaron diferentes dosis de sulfato de aluminio (26 mg/L, 28 mg/L, 30 mg/L, 32 mg/L, 34 mg/L y 36 mg/L).
- Se registraron los resultados de Turbidez, Color Aparente y Real, Aluminio residual y pH) en el formato que se muestra en el anexo 3.

3.6.14.2. Prueba de tratabilidad con polímero como ayudante de floculación

- Se preparó la solución del polímero a la concentración que nos definida por el peso (0.025%).
- Se programó el equipo de pruebas de jarras con los gradientes y tiempos reales de la PTAP

- Las 6 jarras del equipo fueron acondicionadas con las muestras de agua.
- Se prepararon 6 dosis diferentes de polímero para cada jarra (0.05 mg/L, 0.10 mg/L, 0.15 mg/L, 0.20 mg/L, 0.25 mg/L, 0.30 mg/L) no fue necesario aplicar más dosis dado que los resultados respecto a turbidez cumplieron con la curva esperada.
- Se aplicó la dosis optima del coagulante hallado en las pruebas anteriores de coagulante y dosis optima (Sulfato de Aluminio granulado Tipo A = 55 mg/L) para continuar con cada uno de los procesos (Mezcla rápida, proceso de floculación y decantación)
- La aplicación del coagulante se realizó en el proceso de mezcla rápida mientras que el polímero su punto de aplicación es terminar el proceso de mezcla rápida e iniciar el proceso de mezcla lenta o floculación
- Una vez determinada la dosis optima de polímero empleando se aplicó el mismo procedimiento para establecer la dosis optima del coagulante.
- Se aplicó 6 dosis de sulfato de aluminio (35mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L, 50 mg/L, 55 mg/L y 60 mg/L).
- Se registraron los resultados de Turbidez, Color Aparente y Real, Aluminio residual y pH) en el formato mostrado en el anexo 3.

Ya que los resultados obtenidos no sobrepasaron el límite establecido por el reglamento de calidad de agua para consumo humano se procedió a realizar pruebas para determinar los parámetros de diseño: gradientes de velocidad y tiempos de floculación.

Figura 40.

Preparación del polímero y tratamiento



3.6.15. Pruebas de tratabilidad a diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad

- Partiendo de los resultados obtenidos anteriormente, se realizaron pruebas con diferentes gradientes de velocidad para determinar con mayor efectividad la influencia del gradiente de velocidad en el proceso, y establecer el más adecuado de acuerdo al coagulante más efectivo.
- Para estas pruebas se aplicó como coagulante al sulfato de aluminio granulado tipo A considerando una dosis de 30 mg/L para una turbidez baja de 23 UNT para turbidez alta de 453 UNT dosis de 55 mg/L.
- Se programó el equipo de prueba de jarras con gradientes de 20 S⁻¹, 30 S⁻¹, 40 S⁻¹, 50 S⁻¹ y 60 S⁻¹, realizamos una prueba por gradiente con las 6 jarras programando tiempos diferentes de floculación por gradiente (10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30min y 35 min). Véase la Tabla 17

Tabla 17.

Gradientes y tiempos aplicados en las pruebas de tratabilidad

Tiempo (min)	Gradiente (S ⁻¹)				
	20	30	40	50	60

10
15
20 Turbidez final alcanzada por cada gradiente a
25 diferentes tiempos
30
35

–Se graficaron los resultados de turbidez y color obtenidos con los diferentes tiempos y gradientes y los valores óptimos fueron tomados como dato de diseño para un correcto dimensionamiento de los floculadores y decantadores.

Figura 41.

Flocs formados y extracción de la muestra de agua



3.6.16. Pruebas de tratabilidad para determinar la tasa de decantación.

En esta prueba se determinó la tasa de decantación que se emplea como uno de los criterios para el correcto dimensionamiento de los decantadores, para esto, primero se obtuvieron los resultados de turbidez final a diferentes tiempos de floculación, y gradientes de velocidad. En la Tabla 18 se presenta la Tabla que fue empleada para determinar la tasa de decantación.

Tabla 18.

Tabla para los resultados de las pruebas de decantación

T (seg)	V cm/s	Turbidez final (UNT)	Ti / Ti	q m3/m2/d	Vs cm/s	CO	Rt %	Tr	Ti
60	-	-	-	25	-	-	-	-	-
120	-	-	-	30	-	-	-	-	-
180	-	-	-	35	-	-	-	-	-
240	-	-	-	40	-	-	-	-	-
300	-	-	-	50	-	-	-	-	-
600	-	-	-	60	-	-	-	-	-

3.6.17. Diseño de superficie de respuesta

Para la presente investigación se empleó el diseño estadístico de Box y Behnken que de acuerdo con Montgomery (2011) tiene la finalidad de emplear métodos matemáticos y estadísticos para generar una ecuación de regresión con la se pueden ajustar superficies de respuesta, este diseño es adecuado cuando se tiene tres niveles y tres variables de estudio variables de estudio (MINITAB, 2019). Asimismo, estos diseños por lo general son muy eficientes en el requerimiento del número de corridas tal como muestra la Tabla 19.

Tabla 19.

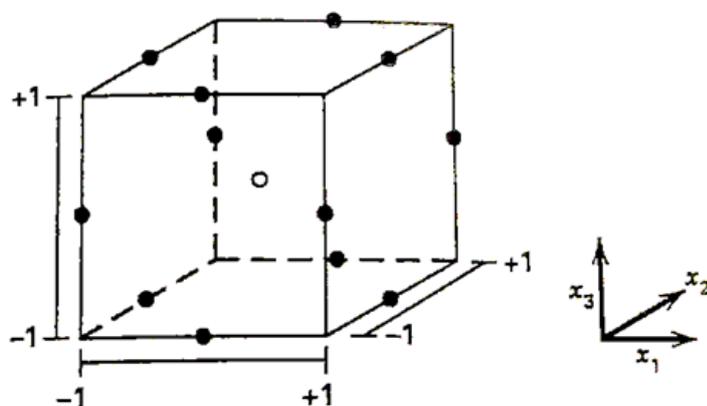
Diseño Box-Behnken para tres variables (Montgomery, 2011)

Corrida	X1	X2	X3	Tiempo (min)	Dosis (mg/L)	Gradiente (S ⁻¹)
1	-1	-1	0	25	25	40
2	1	-1	0	35	25	40
3	-1	1	0	25	35	40
4	1	1	0	35	35	40
5	-1	0	-1	25	30	30
6	1	0	-1	35	30	30
7	-1	0	1	25	30	50
8	1	0	1	35	30	50
9	0	-1	-1	30	25	30
10	0	1	-1	30	35	30
11	0	-1	1	30	25	50
12	0	1	1	30	35	50
13	0	0	0	30	30	40
14	0	0	0	30	30	40
15	0	0	0	30	30	40
16	0	0	0	30	30	40
17	0	0	0	30	30	40

En la Figura 42 se puede apreciar una expresión geométrica de este diseño, al no tener puntos en los vértices de la región cúbica representa una ventaja para el investigador cuando los puntos de los vértices del cubo simbolizan combinaciones de los niveles de los factores cuya prueba podría ser altamente costosa o implicar otro tipo de restricciones en el proceso. Como se mencionó anteriormente, el diseño de Box-Behnken no realiza corridas con los valores extremos de los factores, esto se ve reflejado en la Figura 42 donde no se observan puntos en los vértices de la región cúbica.

Figura 42.

Diseño de Box-Behnken para tres factores.



3.6.18. Factores o variables para la investigación

Para la presente investigación se empleó el diseño Box-Behnken para 3 factores con 3 niveles más 2 puntos centrales que implica la realización de 17 corridas. Los factores independientes fueron: Dosis de coagulante (mg/L), Tiempo de retención (min) y Gradiente de velocidad (S^{-1}) las variables respuesta o factores dependientes fueron: Turbidez final (UNT), eficiencia de remoción de turbidez (%), Color real (UCV) y eficiencia de remoción de color (UNT). Para asignar los niveles de cada uno de los factores se tomaron en cuenta las pruebas de tratabilidad realizadas en laboratorio, como se observa en la Tabla 20 se eligió como punto central el valor que logra mejores resultados, teniendo como referencia el punto central, se establece el punto bajo y alto, asimismo para ambos diseños se aplicó un análisis de varianza con 95 % de intervalo de confianza, utilizando el programa Statistica V13.1.

Tabla 20.

Factores y niveles para el diseño estadístico

Variables independientes	Nivel			Variables dependientes
	-1	0	1	
Dosis de coagulante (mg/L)				Turbidez final (UNT)
Tiempo de retención (min)	Punto bajo	Punto central (nivel de mejor eficiencia)	Punto alto	Eficiencia de remoción de turbidez
Gradiente de velocidad (S^{-1})				Color real (UCV)
				Eficiencia de remoción de color

3.6.19. Propuesta de diseño de planta adecuado para la reducción de color y turbidez.

Una vez obtenidos los tiempos de retención, gradientes de velocidad se usaron las hojas de cálculo con las ecuaciones establecidas por el CEPIS para determinar las medidas de las unidades de tratamiento de la planta de tratamiento de agua potable.

3.6.19.1. Evaluación del proceso de mezcla rápida en la PTAP. Con la visita en campo se pudo visualizar los problemas de la mezcla rápida, de la tubería

de dosificación y el tanque de preparación de la solución y con los planos proporcionados por la EPS se logró identificar los errores de diseño teniendo como referencia los manuales de diseño de plantas de tratamiento de agua potable del CEPIS.

a. **Canal con cambio de pendiente.** Con el caudal de diseño (68.64 l/s) se logró dimensionar la unidad de mezcla rápida aplicando los siguientes criterios de diseño y formulas presentados en la Tabla 21, las ecuaciones son las establecidas en el manual del CEPIS.

Tabla 21.

Ecuaciones para el diseño del canal con cambio de pendiente

Paso	Datos	Unidades	Cálculos	Ecuación	Unidades	
1	Caudal de diseño	Q	L/s m ³ /s	Caudal unitario	q = Q/B	m ³ /s /m
	Ancho del canal	B	m			
	Longitud del plano	X	m			
2	Altura de la rampa	Eo	m	Angulo de inclinación de la rampa	$\Theta = \text{Atan}(Eo/X)$	Radianes Grados sexagesimales
3	Número de Froude (Asumido)	F	cte.	Factor de resolución de la ecuación (K)	$K = \text{Cos}\Theta (F + \text{Cos}\Theta / 2F)$	-
4				Factor de resolución de la ecuación (Φ)	$\Phi = \text{Acos} [F^2 / (2FK/3)^{3/2}]$	Radianes
5				Relación de alturas antes y después del resalto	$a = d2/d1 = (8FK/3)^{0.5} \cdot \text{Cos}(\Phi/3)$	-
6	Aceleración de la gravedad	g	m/s ²	Altura antes del resalto	$d1 = (q^2 / (F^2 \cdot g))^{1/3}$	m
7				Profundidad antes del resalto	$h1 = d1 / \text{cos}\Theta$	m
8				Velocidad antes del resalto	$V1 = q / h1$	m
10				Número de Froude comprobación: ¿Es estable 4?5 - 9?	$F_c = V1 / (g \cdot h1)^{0.5}$	cte.
11				Profundidad después del resalto	$h2 = d2 = a \cdot d1$	m
12				Longitud del resalto	$L = 6 (h2 - h1)$	m
13				Pérdida de carga	$hp = (h2 - h1)^3 / (4 \cdot h2 \cdot h1)$	m
14				Volumen del resalto	$\text{Vol.} = ((h1 + h2) / 2) \cdot L \cdot B$	m ³

Paso	Datos	Unidades	Cálculos	Ecuación	Unidades	
15	Factor para T = 20°C	$(X/\mu)^{0.5}$	-	Gradiente de velocidad: ¿Entre 700 y 1300?	$G = (X/\mu)^{0.5} \cdot (Q \cdot hp/Vol.)^{0.5}$	s ⁻¹
16				Tiempo de mezcla Grada al final del resalto	$T = Vol./Q$ $h = h2/6$	seg m
				Altura de agua en el vertedero	$h3 = (Q/1.84 \cdot B)^{2/3}$	m
17	Longitud canal de ingreso	Li	m	Velocidad de ascensional en el canal de ingreso	$Va = Q / B \cdot Li$	m/s
18				Velocidad de ingreso tubería	Vt: asumir	m/s
19				Diámetro de ingreso		mm
				Diámetro Nominal Comercial (DN)	$D = (4 \cdot (Q / v) / \pi)^{0.5}$	mm
				Diámetro comercial interno		mm

b. Tubería de dosificación. Con el caudal de diseño dimensionar el sistema de dosificación del coagulante para conocer número de orificios, separaciones de orificio a orificio y los diámetros de tubo difusor. Seguir el orden de las ecuaciones establecidas por el CEPIS presentadas en la Tabla 22.

Tabla 22.

Ecuaciones para el diseño de la tubería de dosificación

Paso	Datos	Unidades	Cálculos	Criterios	Unidades	
1	Espacio entre orificios	e	m	Número de orificios en el difusor	$N = B/e$	und
2	Diámetro de los orificios	do	pulg m	Sección de los orificios	$Ao = \pi \cdot do^2/4$	m ²
3	Dosis óptima promedio	D	mg/L	Caudal promedio de solución por aplicar	$q = 1000Q \cdot D/C$	L/s
4	Concentración del sulfato de aluminio en un el punto de aplicación	C	% mg/L			
5				Velocidad en los orificios	$Vo = q / (Ao \cdot N)$	m/s
6	Condición para distribución uniforme	R	-	Velocidad en la tubería	$Vt = Vo \cdot R$	m/s
7				Sección del difusor	$At = q / Vt$	m ²
8				Diámetro del difusor		mm
				Diámetro comercial del difusor	$Dt = (4At/\pi)^{0.5}$	mm
				Diámetro Nominal del difusor (DN)		plug

Paso	Datos	Unidades	Cálculos	Criterios	Unidades	
9	Área corregida del difusor	At'	m ²	Velocidad corregida en el difusor	Vt' = q / At'	m/s
10				Condición para distribución uniforme	R = Vt' / Vo	-

3.6.19.2. Evaluación del proceso de floculación. Con las pruebas de gradientes de velocidad y tiempo de floculación óptimos de laboratorio y con la visita en campo se pudo visualizar los problemas de los tres tramos de los floculadores y con los planos proporcionados por la EPS se logró identificar los errores de diseño por lo que fue necesario rediseñar la unidad con criterios de diseño presentados por el CEPIS.

Con el caudal de diseño (68.64 l/s) se logró dimensionar la unidad de los tres tramos de los floculadores aplicando los siguientes criterios de diseño y formulas presentados en la Tabla 23.

Tabla 23.

Ecuaciones para el diseño de los floculadores

Paso	Datos	Und	Ecuación	Resultados	Und
1	Caudal de diseño	Q	l/s m ³ /s	Longitud de canales del tramo 1	m
	Tiempo de retención en el tramo 1	T1	min.		
2	Velocidad en el tramo 1	V1	m	Selección de canales del tramo 1	m ³
			$A_1 = Q/V_1$		
3	Altura de agua en la unidad	H	m	Ancho de canales del tramo 1	m
			$\alpha_1 = A_1 / H$	Ancho de vueltas del tramo 1	m
			$d_1 = 1.5 * \alpha_1$	Ancho del floculador	m
4	Ancho útil de la lamina	b	m	Número de canales en el tramo 1	unidades
			$B = 3 * b + d_1$		
			$N_1 = L_1 / B$		

Paso	Datos	Und	Ecuación	Resultados	Und	
5	Espesor de las láminas	e	m	$L_1 = N_1 * \alpha_1 + (N_1 - 1) * e$	Longitud total del tramo 1	m
6	Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas	k	und	$h_1 = k * V_1^{0.5} * (N_1 - 1) / 2g$	Perdida de carga en las vueltas del tramo 1	m
7	Gravedad	g	m/s ³	$P_1 = 2 * H + \alpha_1$	Perímetro mojado de las secciones del tramo 1	m
8	Coefficiente de rugosidad	n	und	$h_2 = ((n * V^4) / r^{2/3}) * L_1$	Perdida de carga en los canales del tramo 1	m
				$r = B * H / (B + 2 * H)$	Radio Hidráulico del canal	m
				$hf_1 = h_1 + h_2$	Perdida de carga total en el tramo 1	m
9	Factor para T=20 °C	$(X/\mu)_{0.5}$		$G_1 = (X/\mu)^{0.5} * (hf / T_1)^{0.5}$	Gradiente de velocidad en el tramo 1	32 RPM

3.6.19.3. Evaluación del proceso de decantación. Con la visita en campo, las pruebas de decantación de laboratorio y con los planos proporcionados por la EPS se logró identificar los errores de diseño por lo que fue necesario rediseñar la unidad con criterios de diseño presentados por el CEPIS.

a. Dimensionamiento del canal lateral. Con las ecuaciones presentadas en el cuadro 24 dimensionar el canal lateral para la distribución del agua floculada a los cuatro decantadores.

Tabla 24. Ecuaciones para el diseño de los floculadores

Paso	Datos	Und	Cálculos	Fórmulas	Und	
1	Caudal	Q	Caudal ingreso a cada decantador	$q = Q/N$	m ³ /s	
2	N° de Decantadores	N				cte.
3	Ancho del Canal	B	Sección final del canal	$A_f = H_f \times B$	m ²	
4	Altura Mínima	H _f				m
5			Velocidad en sección final del canal	$V_f = q/A_f$	m/s	
6	Velocidad en la Sección Inicial	V _i	m/s	Sección inicial del canal	$A_i = Q/V_i$	m ²
				Altura inicial del canal	$H_i = A_i/B$	m
7	Velocidades en los Laterales	V _L	m/s	Sección útil de las compuertas	$A_L = q/V_L$	m ²
				Ancho de las compuertas	b	m
8	Coefficientes Experimentales de Hudson	Θ	cte.	Coefficiente de pérdida de carga en los orificios de las compuertas	$\beta_1 = 1 + \Theta + \emptyset \times (V_i/V_L)^2$	cte.
		\emptyset	cte.			
9	De la Tabla 1	$\sum(1/\beta_{0.5})$		Velocidad real en la primera compuerta	$V_{L1} = Q_t / (A_L \times \beta_1^{0.5} \times \sum(1/\beta_{0.5}))$	m/s

Paso	Datos	Und	Cálculos	Fórmulas	Und	
10	De La Tabla 1	β_n	Velocidad real en última compuerta	$V_{L_n} = Q_t / (AL \times \beta_n^{0.5} \times \sum(1/\beta^{0.5}))$	m/s	
11			Desviación de caudal - ¿Aceptable? Pérdida de carga en las compuertas	$\Delta = (V_{L_n} - V_{L_1}) / V_{L_n}$ $hf = \beta_n \times V_{L_n}^2 / 2g$	% m	
12	Ancho de sección - compuerta Tirante de sección - compuerta	b y	m m	Radio hidráulico de una compuerta	$R_H = by / (b+2y)$	m
13	T = 20°C	$(\chi/\mu)_{0.5}$ coef. Darc y (f) R_H g	cte. cte. m m/s ²	Gradiente de velocidad al paso del flujo por compuertas (G)	$G = (\chi/\mu)^{0.5} (1/2g)^{0.5} (f/4R_H)^{0.5} V_{L_n}^{1.5}$	s ⁻¹

b. Dimensionamiento de la tubería de distribución de agua en los decantadores. Con las ecuaciones presentadas en la Tabla 25 dimensionar la tubería de distribución de agua a los decantadores

Tabla 25.

Ecuaciones para el dimensionamiento de la tubería de distribución de agua en los decantadores

Paso	Datos	Und	Resultado	Fórmula	Und	
1	Caudal de un decantador en condiciones mantenimiento de una unidad Numero de hileras de orificios x canal central	q n	m3/s	Caudal en cada canal / tuberías Caudal por hilera de orificios	$Q_t = q / m$ $Q_d = Q_t / n$	m3/s m3/s
2	Velocidad en los orificios	VL	m/s	Área total de orificios por hilera	$AT = Q_d / VL$	m2
3	Separación centro a centro entre orificio Distancia entre la pared y el primer orificio Longitud del canal.	a D L	m m m	Número de orificios por hilera de cada lado del canal	$N = (L-2D) / a + 1$	Und.
4	Numero canales / tuberías x decantador	m	m	Área de cada orificio.	$AL = AT / N$	m2

Paso	Datos	Und	Resultado	Fórmula	Und	
5			Diámetro de los orificios	$d = (AL \cdot 4/\pi)^{0.5}$	mm	
			Diámetro comercial nominal (DN)		mm	
			Diámetro comercial del orificio		mm	
6	Ancho de la mitad del canal central	B	m	Sección en el extremo final del canal	$Af = B \times h$ $Af = (\pi h^2)/4$	m ²
	Altura mínima	h	m			
7			Caudal por orificio.	$qo = Qd / N$	m ³ /s	
			Caudal que llega al extremo final del canal	$Qf = n \cdot qo$	m ³ /s	
			Velocidad en el extremo final del canal	$Vf = Qf / Af$	m/s	
8	Altura máxima del canal	H	m	Sección inicial del canal.	$Ac = B \times H$	m ²
9				Velocidad en el extremo inicial.	$Vc = Qd / Ac$	m/s
10	Coeficientes experimentales	Θ	cte.	Coeficiente pérdida de carga total en el primer orificio del canal	$\beta_1 = 1 + \Theta + \emptyset \times (Vc/VL)^2$	cte.
		\emptyset	cte.	Coeficiente de pérdida de carga en el último orificio del canal	$\beta_n = 1 + \Theta + \emptyset \times (Vn/VL)^2$	cte.
11	De la Tabla 2	$\sum(1/\beta^{0.5})$	cte.	Velocidad real en el primer orificio	$VL_1 = Qt / (AL \times \beta_1^{0.5} \times \sum(1/\beta^{0.5}))$	m/s
				Velocidad real en el último orificio	$VL_n = Qt / (AL \times \beta_n^{0.5} \times \sum(1/\beta^{0.5}))$	m/s
				Desviación de caudal entre el primer y el último orificio - ¿Aceptable?	$\Delta = (VL_n - VL_1) / VL_n$	%
12				Pérdida de carga en las compuertas	$hf = \beta_n \times VL_n^2 / 2g$	m
13	T = 20°C	$(\chi/\mu)^{0.5}$	cte.	Radio hidráulico de una compuerta	$RH = d \cdot 0.025/4$	
		f R _H g	cte. m m/s ²	Gradiente de velocidad en los orificios	$G = (\chi/\mu)^{0.5} (1/2g)^{0.5} (f/4R_H)^{0.5} VL^{1.5}$	s ⁻¹

c. **Dimensionamiento de la zona de sedimentación.** Con las ecuaciones presentadas en la Tabla 26 dimensionar la zona de sedimentación

Tabla 26.

Dimensionamiento de la zona de sedimentación

Paso	Datos	Und	Cálculos	Fórmulas	Und
1	Separación de las placas en el plano horizontal Espesor de las lonas Angulo de inclinación de las placas	e' e θ	cm cm °	Espaciamiento perpendicular entre las placas	$d = e' \times \text{sen}\theta - e$ cm
2	Longitud del módulo de placas (comercial $l=1.2$ m)	l	m	Longitud útil dentro de las placas Longitud relativa del módulo de placas	$Lu = l - e' \times \text{cos}\theta$ $L = Lu / d$ cm m
3	Módulo de eficiencia de las placas	s	cte.		
4	Velocidad de sedimentación de las partículas (laboratorio)	Vs	m/s	Coeficiente del Módulo de Placas	$f = \text{sen}\theta \times (\text{sen}\theta + L\text{cos}\theta) / s$ cte.
5	Tasa de decantación real	qr	$m^3/m^2/d$		
6	Caudal de diseño por decantador	Q	m^3/s	Área superficial de la unidad	$As = Q / (f * Vs)$ m^2
7	Ancho total neto de la zona de decantación	B	m	Número de canales formados por las placas	$N = As \times \text{sen}\theta / (B \times d)$
8				Longitud total del decantador	$LT = l \times \text{cos}\theta + (N \times d + (N+1) \times e) / \text{sen}\theta$ m
9				Velocidad media del flujo	$Vo = Q / (As \times \text{sen}\theta)$ cm/s
10	Ancho del módulo de placas	$b = B$	m	Radio hidráulico del módulo de placas	$RH = b \times d / (2 \times (b + d))$ cm
11	Viscosidad a $T^0 = 23$ °C	v	cm^2/s	Número de Reynolds	$NR = 4RH * Vo / v$
12				Velocidad Longitudinal máxima - ¿Mayor a Vo ?	$Vo' = (NR/8)^{0.5} * Vs$ cm/s

d. Dimensionamiento de la zona de la tubería de recolección de agua

decantada. Con las ecuaciones presentadas en la Tabla 27 dimensionar la zona de recolección de agua decantada

Tabla 27.

Dimensionamiento de la tubería de recolección de agua decantada

Paso	Datos	Und	Resultados	Fórmula	Und	
1	Caudal por decantador	Q	m ³ /s	Longitud total de tuberías de recolección	Lv= Q / qv	m
2	Tasa de diseño de las tuberías de recolección	qv	L/s/m			
3	Ancho total del módulo de placas	B	m	Numero de tubos por decantador (En cada módulo seria N/2)	N = Lv/b o Lv/L	Und
	Ancho del módulo de placas	b	m	Valores corregidos	Lv' = b x N o L*N	m
	Longitud total del decantador	L	m		qv' = Q/Lv'	l/s/m
4	Espaciamientos entre orificios	e	m	Número de orificios por tubo en cada modulo	n = L/ e	Und
5	Diámetro de los orificios	d o	pulg. m	Área del orificio	Ao = do ² × π/4	m ²
6	Relación para recolección uniforme que asegura una desviación <5% 0.15 >= n x Ao / At	R		Área útil de la tubería (todos los orificios)	At = n x Ao / R	m ²
				Diámetro tubería		mm
				Diámetro nominal de la tubería (DN)	Dt = (4 x At / π) ^{0.5}	mm
				Diámetro comercial de la tubería		mm
7	Gravedad	g	m/s ²	Numero de orificios por decantador	Nto = N * n	Und
				Caudal por orificio	Qo = Q/Nto	m ³ /s
				Velocidad por orificio	Vo = 4*Qo/ (PI *do ²)	m/s
				Altura de agua sobre las tuberías	h = (Vo ²) / (2 * g)	cm
8	Verificación	At	m ²	< 0.15	R = n x Ao / At	-

e. Dimensionamiento de la zona de lodos. Con las ecuaciones

presentadas en el cuadro 28 se dimensionó la zona de recolección de lodos

Tabla 28.

Dimensionamiento de la zona de recolección lodos

Paso	Datos	Und	Cálculo	Fórmula	Und	
1	Longitud del decantador	L	m	Volumen de la tolva	Vtol=((b+a) /2) *h*L	m ³
2	Número de tolvas por decantador	n	cte.			
3	Ancho total del decantador	B		Volumen de lodo producido	Vlop =Qd*ql*86400	m ³ /días
4	Profundidad de las tolvas	h	m	Tiempo de retención de la Tolva	Tr = Vtol/Vlop	días

Paso	Datos	Und	Cálculo	Fórmula	Und	
5	Ancho de la tolva	a	m	Numero de orificios en el canal de recolector	$No = L/e$	und
6	Tasa de producción de lodos (dato que se obtiene de las pruebas de laboratorio)	ql	-	Sección del canal recolector	$S = (((d*0.0254)^2) * 3.1416/4) * N^0 / R$	m2
7	Caudal de diseño	Qd	m3/s	Altura del canal de recolección	$Hc = S / b$	m
8	Ancho canal recolector	b	m			
9	Diámetro de orificios	d	pulg			
10	Espaciamiento horizontal entre orificios	e	m			
11	Relación para recolección uniforme que asegura una desviación <5% $0.15 > = n \times A_o / A_t$	R	-			

f. Dimensionamiento de la zona de extracción de lodos. Se emplearon las ecuaciones presentadas en la Tabla 29 para dimensionar la zona de extracción de lodos, estas ecuaciones fueron tomadas de los manuales del CEPIS.

Tabla 29.

Dimensionamiento de la zona de extracción de lodos

Paso	Datos	Und	Cálculos	Fórmulas	Und	
1	Longitud del decantador	L	m	Longitud de la base mayor de cada tolva	$x = L / N$	m
2	Número de tolvas por decantador a lo largo	N	und			
3	Ancho total del decantador	B	m	Sección máxima de la tolva	$A = L1 * x$	m2
	numero de tolvas a lo ancho	N1	und	Angulo del lado 1 de la tolva inclinada	$\beta 1 = \text{ArcTan}(x/2/h)$	°

Paso	Datos	Un d	Cálculos	Fórmulas	Und	
	Ancho de cada módulo del decantador	L1	m	Angulo del lado 2 de la tolva inclinada	$\beta 1 = \text{ArcTan}(B/2/h)$	°
4	Profundidad de la sección recta de la tolva	h1	m	Volumen de la parte recta de la tolva	$Vt1 = A * h1 * N$	m3
5	Profundidad del tronco de pirámide de la tolva	h	m	Volumen del tronco de pirámide de la tolva	$Vt2 = (1/3) * A * h * N$	m3
6	Tasa de producción de lodos (dato que se obtiene de las pruebas de laboratorio)	ql	L * L/s	Caudal de lodos producidos por la unidad en época de lluvias	$Ql = ql * Qd$	L/s
				Frecuencia de descarga	$F = (Vt1 + Vt2) / (Ql * 86.4)$	días
7	Caudal de diseño	Qd	m3/ s	Diámetro de los orificios de descarga		mm
				Diámetro Nominal del orificio (DN)	$d = x / (1.162 * (H^{0.5} / Va)^{0.5})$	mm
8	Velocidad de arrastre	Va	cm/ s	Diámetro comercial de los orificios de descarga		mm
9	Carga hidráulica	H	m	Diámetro del colector		mm
10	Relación de velocidades para una desviación de 10%	R	-	Diámetro Nominal del colector (DN)	$D = d / (R/N)^{0.5}$	mm
				Diámetro comercial del colector		mm
11	Numero de módulos	n	und	Sección de colector	$Ac = (PI * D^2) / 4$	m2
				Caudal de descarga de lodos	$Qdes = m * Ac * (2 * g * H)^{0.5}$	m3/s
12	Coefficiente de descarga orificio	m	-	Volumen de descarga de lodos	$Vdes = (Vti + Vt2) / n$	m3
13	gravedad	g	m/s 2	Tiempo de descarga	$Tdes = Vdes / Qdes$	seg

1.1.1.1. Evaluación del proceso de filtración

Con la visita en campo y con los planos proporcionados por la EPS se logró identificar los errores de diseño por lo que fue necesario rediseñar la unidad con criterios de diseño presentados por el CEPIS. Con las ecuaciones presentadas en la Tabla 30 se realizó el dimensionamiento de las baterías de filtros.

Tabla 30.

Cálculo de dimensionamiento de las baterías de filtros

Dimensionamiento de la batería de filtros				
Paso	Datos			Unid
1	Caudal	Q		(m ³ /s)
2	Velocidad ascens. Lavado	V_a		m/min
3	T. fil o Vel. Filtración prom	V_f		m ³ /m ² /día
Área y dimensiones del filtro				
4	Área de cada filtro	AF	$AF=Q/V_a$	m ²
5	Área total de filtros	AT	$AT=Q/V_f$	m ²
6	Número de filtros	N	$N=AT/AF$	
7	Ancho del filtro	B		m
8	Longitud del filtro	L_f	1.88	m
Características del agua				
9	Temperatura (°C)	T		
10	Dens.agua. (gr/cms ²)	ρ_a		
11	Visc.absol (kg/ (s.m))			
12	P. Esp.agua (kg/m ³)			
13	Ac. gravedad(m/s ²)			
Características del medio filtrante				
			Arena	Antracita
15	Espesor de la capa	L	L	L'
16	Tamaño.efec. D10 (mm)			
17	D60 (t.60%)			
18	D90 (t.90%)			
19	Densidad (gr/cm ³)	ρ_s		
20	P. específico (kg/m ³)			
21	Porosidad	ϵ_o		
22	Coef. Esfericidad (ce)	C_e		
23	Coef. Uniformidad			
24	Porosidad			
25	Tamaño máximo (mm)			
26	Tamaño mínimo (mm)			
Cálculo de la expansión de medio filtrante en el lavado				
27	Porosidad expandida arena	ϵ_e	$\epsilon_e = 1 - [1/\sum x_i (1-\epsilon_i)]$	%
28	Porosidad expandida antracita.	ϵ'_e	$\epsilon'_e = 1 - [1/\sum x'_i (1-\epsilon_i)]$	%
29	% exp. arena	E	$E=(\epsilon_e-\epsilon_o) (1-\epsilon_e)$	%
30	% exp. antracita	E'	$E'=(\epsilon'_e-\epsilon'_o) (1-\epsilon'_e)$	%
31	Alt. lecho filtrante expandido	L_e	$L_e = L (1 + E) + L' (1 + E')$	m
Diseño de canaletas de lavado				
32	N° canaletas	N_3		
33	Alt. Útil canaleta (m)	h_o		m
34	Caudal que recolecta la canaleta	Q_c	$Q_c=1.3Q/N_3$	m ³ /min
35	Ancho canaleta (m)	W	$W=Q_c/82.5*h_o^{3/2}$	m
36	Alt.total cnlta (m)	H_3	$H_3=1.5*h_o+H_4$	m
37	h4 cnlta filt (m)	H_4		m
38	Alt. Entre lecho (m) expandido y fondo cnlta.		.1	m

39	Alt. Total, desde la superf. Lecho al (m) borde cnlta.		$0.3*L+L'+ho$	m
40	Longitud de vigueta		Lf	m
Diseño del falso fondo				
Paso	Datos			Unid
41	H. falso fondo(m)	H_1		m
42	Ancho falso fondo (m)		Lf	m
43	Sec.trans. F. Fdo (m2)		$H1*Lf$	m2
44	V.retvl f. Fdo (m/s)		Q/Sf	m/s
45	K falso fondo			cte.
Diseño del sistema de drenaje				
46	Alt. Drenaje + grava(m)	H_2		m
47	N.º viguetas drenaje	N_1	$N_1=B/b$	
48	N.º orificios por vigueta	N_2	$2c/e$	
49	N.º orificios drenaje	NT	$NT=N_1*N_2$	
50	Ancho vigueta(m)	b	0.3	m
51	Distancia orificios (m)	e	0.1	m
52	Long. Unid y vigueta (m)	c		m
53	Diámetro orifico (plg.)	do	$\frac{3}{4}''$ o $.0019$	pulg
54	Cd. orificios			
55	Área orificios drenaje (m2)	Ao	$Ao=\pi*do^2/4$	m2
56	Q lav. orificio (m3/s)	qo	$qo=Q/NT$	m3/s
Cálculo de la altura de la canaleta de lavado				
57	H. dren+grava(m)		$H2$	m
58	H. capa arena(m)		L	m
59	H. capa antr. (m)		L'	m
60	Alt.borde.cnlta fondo (m)	Hc	$Hc=H1+H2+H3+H4$	m
61	Alt.borde.cnlta fondo (m)		$H4+H1+H2+L+L'$	m
62	Alt.borde.cnlta fondo (m)		$H2+$	m
Cálculo de la pérdida de carga en el retrolavado				
63	Perdida de carga en arena (m)		$hf=(1-\epsilon_o) ((\rho_s-\rho_a) / \rho_a) *L$	m
64	Perd. De carga en antracita. (m)		$hf=(1-\epsilon_o) ((\rho_s-\rho_a) / \rho_a) *L$	m
65	Perd. De carga medio filt. (m)		$hf_{arena}+hf_{antracita}$	m
66	Perd. De carga drenaje. (m)		$hf_3=qo^2/2cd^2 Ao^2g$	m
67	Perd. De carga falso fondo (m)		$hf_3=KVFF^2/2g$	m
68	Perd. Carga cpta. Salida (m)		$hf_4=Kvc^2/2g$	m
69	Perd. Carga canaleta (m)		$hf_5=(1.3Q/(1.84(2N_3 C)))^{2/3}$	m
70	Perd. Carga total retrolavado(m)		$hf_1+ hf_2+ hf_3+ hf_4+ hf_5$	m
71	Nivel de vertedero de salida de la batería(m)		$hv=hc+hf_{lavado}$	m
Diseño de compuertas o válvulas				

Salida		
72	Velocidad comp. salida (m/s)	m/s
73	K cpta salida	cte.
74	Sección cpta. Salida (m2)	m2
75	Diámetro de válvula tipo (m) mariposa (pulgadas)	pulg
Entrada		
76	Velocidad comp entrada (m/s)	m/s
77	K cpta entrada	cte.
78	Sección cpta. Entrada (m2)	m/2
79	Diámetro de válvula tipo (m) mariposa (pulgadas)	pulg

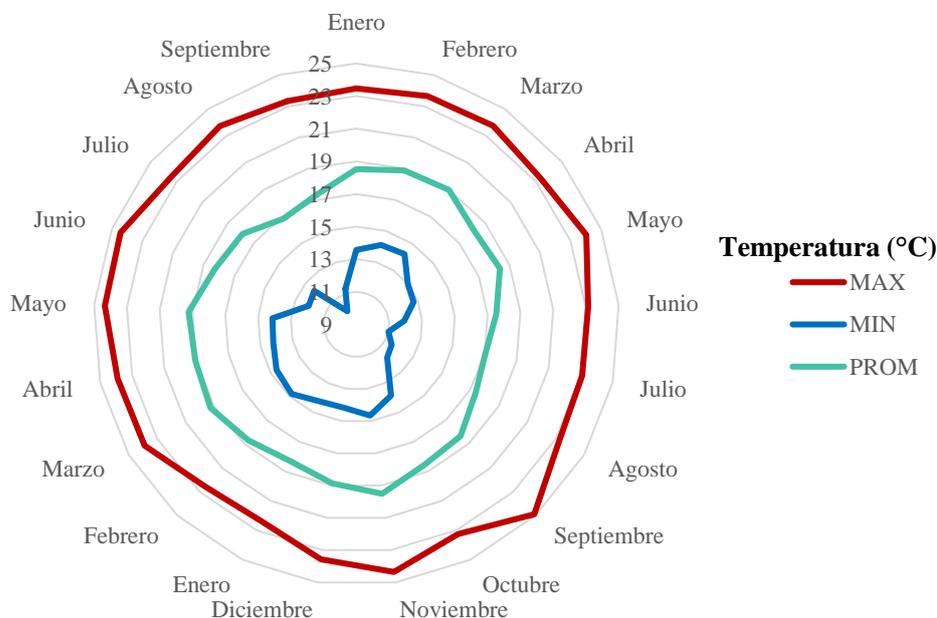
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados de temperatura ambiente

Los resultados de temperatura ambiente a lo largo del año en el distrito de Villa Rica se muestran en un gráfico de superficie o radial donde se presentan rangos de temperatura de eje a eje oscilando de 9°C a 25°C. En la Figura 43 se observa que el promedio de temperaturas altas a lo largo del año varía entre 22°C y 25°C, las temperaturas bajas oscilan entre 10°C y 15°C y la temperatura promedio mensual oscila entre 17°C y 20°C. Estos datos concuerdan con la zona a la cual pertenece según el mapa de clasificación de climas del SENAMHI que señala que estas variaciones de temperatura son características de una zona de selva trópica húmeda.

Figura 43.

Resultado de la variación de temperatura mensual 2018-2019 (SENAMHI, 2019b)



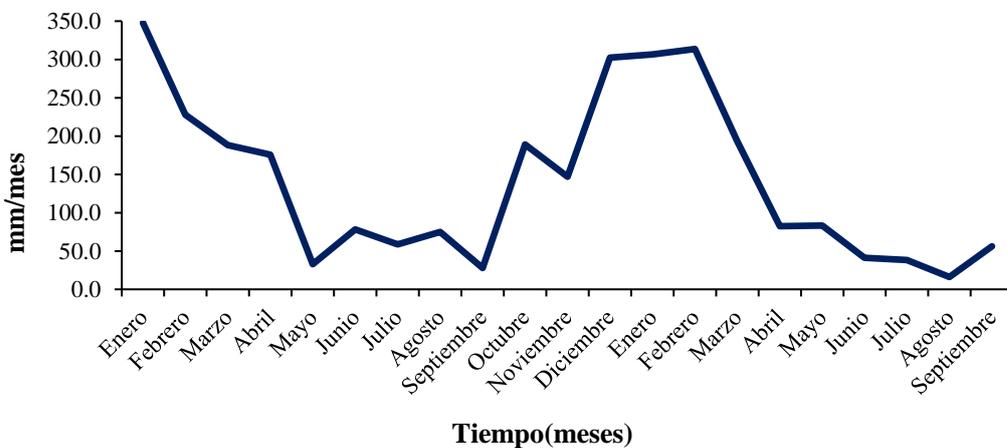
4.2. Resultados de las precipitaciones en Villa Rica

Los resultados de la precipitación a lo largo del año en el distrito de Villa Rica se muestran en un gráfico de líneas donde dichos valores oscilan entre 16 y 347

mm/mes en función a las estaciones del año. En la Figura 44 se observa que las precipitaciones se incrementan gradualmente desde septiembre, y son muy frecuentes entre diciembre y marzo, lapso en el que superan los 300 mm/mes; este comportamiento se debe al cambio de dirección de los vientos alisios sobre la amazonia, las precipitaciones disminuyen a partir del mes de abril (SENAMHI, 2019b, 2019a).

Figura 44.

Resultado de la precipitación mensual 2018-2019



Debido a que la humedad relativa en esta zona es alta por las lluvias y a la cantidad de cubierta vegetal propia del lugar la evapotranspiración oscila entre 80% y 87% a lo largo del año.

4.3. Resultados de la estimación de la población y demanda de agua potable

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), la tasa de crecimiento anual de la población en Villa Rica es positiva con un valor de 0.75%. En la Tabla 31 se muestran los resultados de la estimación de la población, la data obtenida muestra de manera gráfica en la Figura 45, que al año presente la población cuenta con 20 488 habitantes y el crecimiento poblacional dentro de 20 años será de 24 353 habitantes.

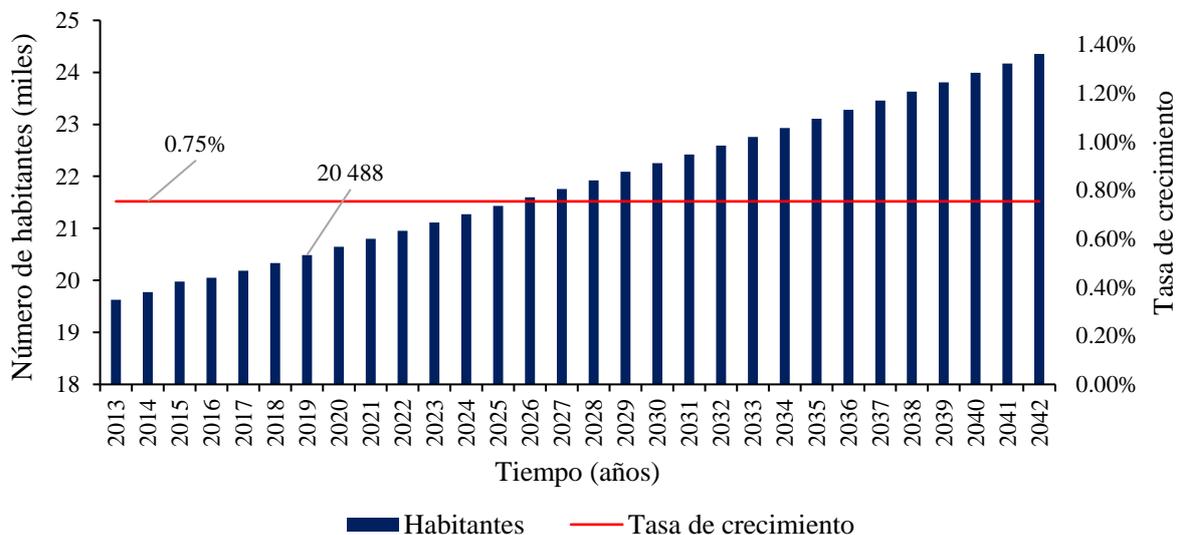
Tabla 31.

Resultados de la estimación de la población futura de acuerdo a la tasa de crecimiento poblacional

Tasa de crecimiento (r)	Cobertura de agua	Población total		Dotación (l/hab/d)	Kmd	Lavado de filtros 5%	
0.74%	96.60%	2007	2012	220	1.3	1.3	
		18619	19776				
Año	Población total (hab)	t	Población servida (hab)	Q promedio (L/s)	Q máx. diario (L/s)	Q Lavado de filtros (L/s)	Q diseño (L/s)
2019	20368	0	19675	50.10	65.13	3.26	68.39
2020	20519		19821	50.47	65.61	3.28	68.89
2021	20670		19968	50.84	66.10	3.30	69.40
2022	20823	5	20115	51.22	66.59	3.33	69.92
2023	20978		20264	51.60	67.08	3.35	70.43
2024	21133		20414	51.98	67.57	3.38	70.95
2025	21289		20565	52.37	68.07	3.40	71.48
2026	21447		20717	52.75	68.58	3.43	72.01
2027	21605	10	20871	53.14	69.09	3.45	72.54
2028	21765		21025	53.54	69.60	3.48	73.08
2029	21926		21181	53.93	70.11	3.51	73.62
2030	22089		21338	54.33	70.63	3.53	74.16
2031	22252		21495	54.73	71.15	3.56	74.71
2032	22417	15	21655	55.14	71.68	3.58	75.26
2033	22583		21815	55.55	72.21	3.61	75.82
2034	22750		21976	55.96	72.75	3.64	76.38
2035	22918		22139	56.37	73.28	3.66	76.95
2036	23088		22303	56.79	73.83	3.69	77.52
2037	23258	20	22468	57.21	74.37	3.72	78.09
2038	23431		22634	57.63	74.92	3.75	78.67
2039	23604		22801	58.06	75.48	3.77	79.25

Figura 45.

Resultados de la estimación de población futura

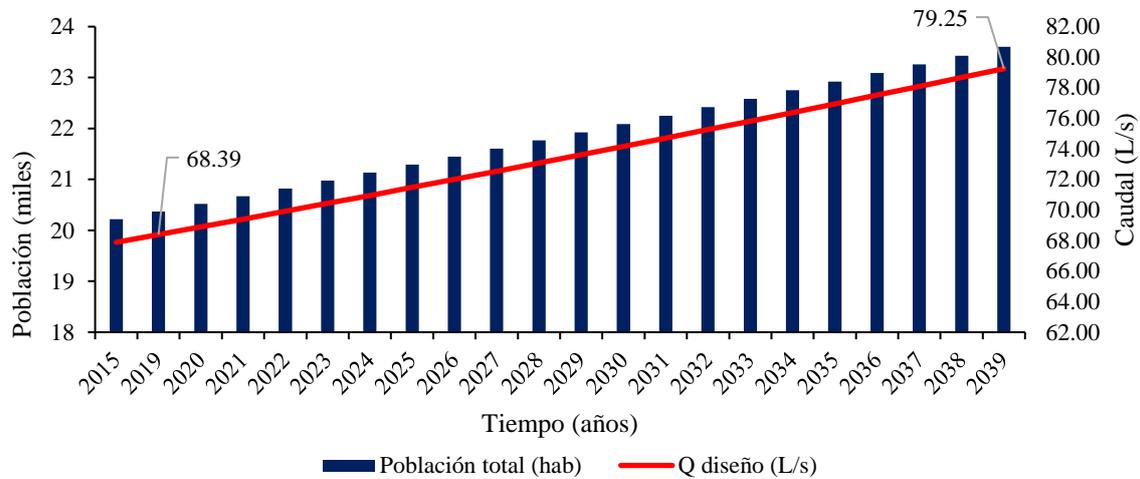


Respecto a la demanda de agua en la población de Villa Rica, el caudal de diseño ha sido proyectado para un horizonte de 20 años, los caudales de diseño de planta corresponden a los máximos diarios más 5% adicional por concepto de pérdidas en la operación de la planta (lavado de filtros, purga de lodos de decantadores y limpieza eventual de las unidades). Los resultados se muestran en la Tabla 31 y son esquematizados en un gráfico de barras. La cobertura de agua en el plan optimizado de la EPS Selva Central es de 96.6% dicha cobertura indica que 19 675 habitantes cuentan con el servicio de agua potable.

Para estimar el caudal de diseño de la planta de tratamiento de agua la norma OS.100 del Ministerio de Vivienda indica que la dotación de agua a considerar en climas templados y cálidos es de 220 L/hab/día, por lo que al presente año el caudal de operación que le corresponde a la planta de tratamiento es de 68.39 L/s como muestra el gráfico de barras de la Figura46; para alcanzar la cobertura de agua potable, no obstante, a la fecha la planta se encuentra operando con 57.7 L/s debido a que en la proyección de la planta sólo se consideró a la población urbana como una población total. Aparte de ello, para alcanzar la cobertura de agua en los próximos 20 años, la planta deberá operar con un caudal de 79.25 L/s de acuerdo a la población que le corresponde.

Figura 46.

Resultados de la proyección de población en los próximos 20 años y demanda de



caudal requerido

4.4. Resultados de la calidad del afluente y efluente

La planta de tratamiento de agua es abastecida por el agua del río Ñagazú, en la Tabla 32 se observan las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua; De Vargas (2004b) menciona que, en los embalses y ríos de la selva, generalmente el agua es altamente coloreada y con altos niveles de turbidez por la presencia de materia orgánica. Orellana (2005) menciona que el color de las aguas está relacionado con el contenido de materia en suspensión o coloidales y de materias orgánicas que generalmente abunda en las fuentes de aguas superficiales de la selva dificultando los procesos de tratamiento o remoción con los resultados del monitoreo también se puede evidenciar que dichos parámetros no cumplen con el reglamento de calidad de agua para consumo humano ya que se encuentran por encima de la norma establecida en el efluente de PTAP, turbidez con 67 UNT y color con 404 UCV,

estos resultados corresponden al mes de enero en la época de lluvia donde los niveles de color y turbidez se incrementan.

Tabla 32.

Resultado de calidad de agua, enero de 2019

Parámetro	Unidades	Entrada PTAP	Salida PTAP	D. S. N° 031-2010-SA Límite máximo permisible
Turbidez	NTU	564	67	5
Color verdadero	UCV	1288	404	15
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	79,8		-
pH		7,4	6.8	6,5 a 8,5
Dureza Total	mg/L	61	36	500,0
Cloruros	mg/L	0,6	3.6	250
Nitratos	mg/L	0.12		50,00
Fluoruro	mg/L	0.04		1
Sulfatos	mg/L	10,3	54	250,0
Solidos Totales Disueltos	mg/L	108	44	1000
Conductividad	µS/cm	243,5	79.9	1500
Amoniaco	mg/L	0,13		1,5
Manganeso	mg/L	0.068		0,4
Hierro	mg/L	0.57	0.26	0,3
Selenio	mg/ l	0,0017		0,01
Mercurio	mg/L	N.D.		0.001
Cromo	mg/L	0,0009		0,05
Parámetro	Unidades	Entrada PTAP	Salida PTAP	D. S. N° 031-2010-SA Límite máximo permisible
Zinc	mg/L	0.006		3,0
Aluminio	mg/L	0,57		0.2
Arsénico	mg/L	0.0005	<0.0001	0.01
Cadmio	mg/L	N.D.		0.003
Plomo	mg/L	0.00089	<0.01	0.01
Sodio	mg/L	2,32		200
Cobre	mg/L	0,00164		2,0
Bario	mg/L	0,0453		0,7
Boro	mg/L	ND		1,5
Coliformes totales	UFC/100 ml	0	0	0
Coliformes fecales	UFC/100 ml	0	0	0

Los

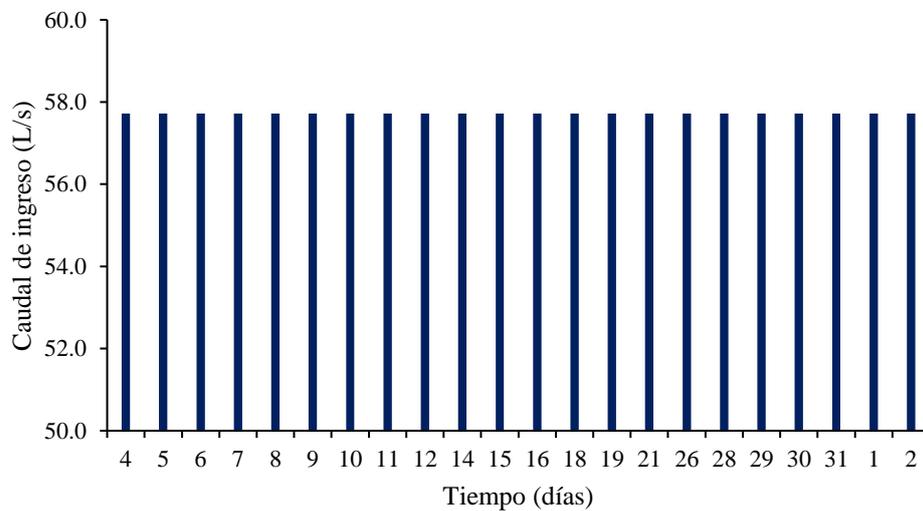
análisis han sido realizados por el laboratorio Envirolab, reportados en el Informe de Ensayo N° 1309435.

4.5. Resultados del caudal y el volumen de agua tratado por la planta en el mes de enero

a. **Caudal de ingreso a PTAP.** El resultado del registro del caudal de ingreso a la PTAP se presenta en un gráfico de barras donde se observa que los valores son constantes, en la Figura 47 se observa que el caudal de operación es de 57.78 L/s (medido en el vertedero de ingreso) el ingreso de agua a la planta es regulada con una válvula tipo compuerta es por ello que el caudal es constante y regulable.

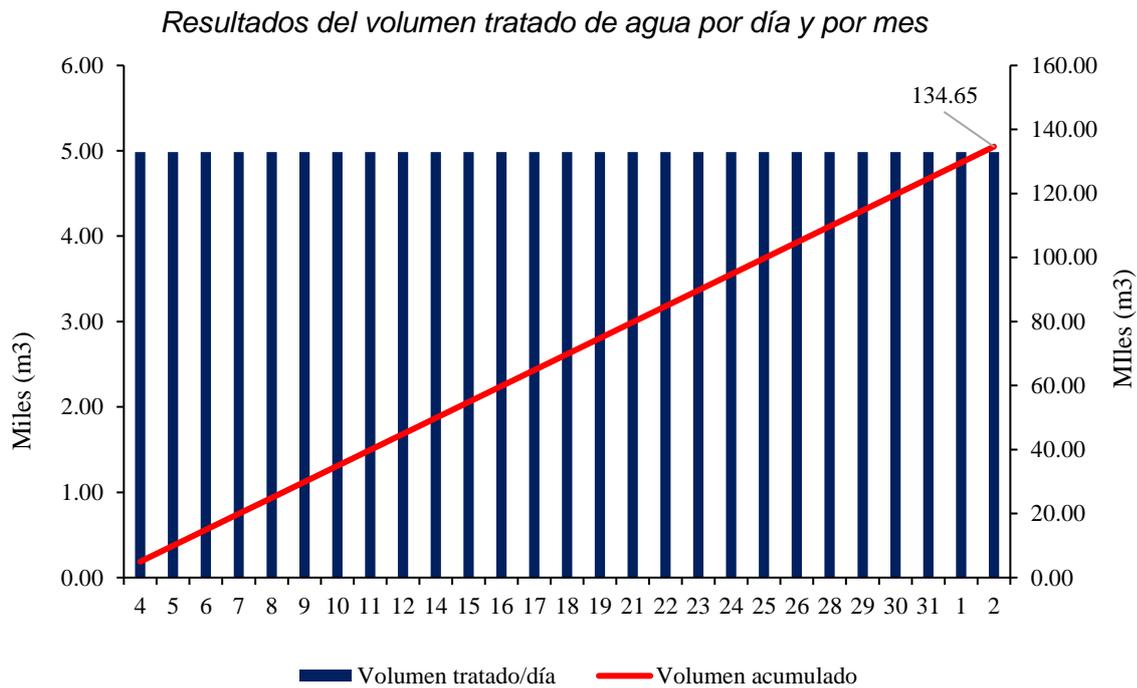
Figura 47.

Resultados del registro del ingreso de caudal en la PTAP



b. **Volumen de agua tratado en la PTAP.** El resultado del volumen tratado en la PTAP se presenta en un gráfico de barras donde se observa que los valores son constantes. En la Figura 48 se puede observar que el volumen de agua tratado por día que alcanza casi los 5 000 m³ y por mes más de 134 000 m³.

Figura 48.



4.6. Resultados del monitoreo de la turbidez del agua en la planta

4.6.1. Turbidez del afluente

Los resultados de los monitoreos realizados en los años 2016 y 2017 se muestran en un gráfico de barras. En la Figura 49 podemos ver la frecuencia acumulada de la turbidez donde:

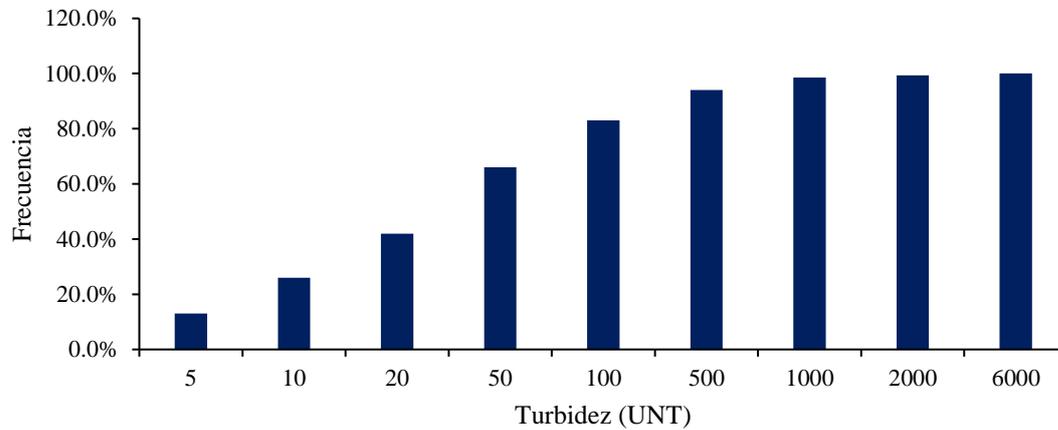
- El 42% del tiempo el agua presenta una turbidez menor a 20 NTU.
- El 66% del tiempo el agua presenta una turbidez menor a 50 NTU.
- El 83% del tiempo el agua presenta una turbidez menor a 100 NTU.
- Esporádicamente se registraron valores mayores a 2,000 NTU.

A lo largo del año los valores de turbidez varían de acuerdo al cambio de las estaciones, esto básicamente por las precipitaciones registradas entre los meses de

diciembre a marzo (SENAMHI, 2019b). Los valores máximos de turbidez representan a estos meses donde se registra mayor precipitación.

Figura 49.

Resultados de la frecuencia acumulada de turbidez de agua cruda 2016 - 2017

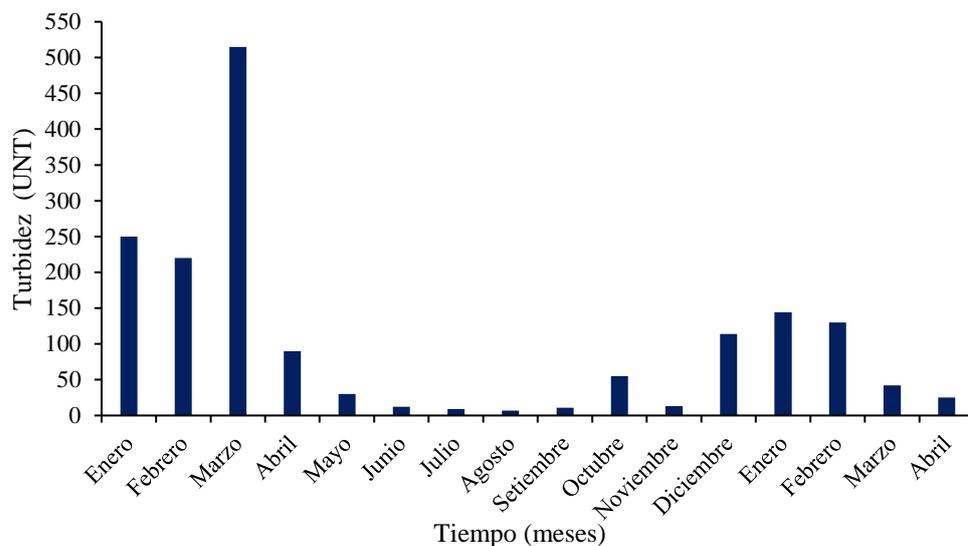


El resultado del registro de la turbidez a largo del año se presenta en un gráfico de barras, en la Figura 50 se observa lo siguiente:

- De mayo a noviembre se presentan datos de turbidez promedio menor a 55 NTU.
- Los valores más elevados se registraron en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.
- La turbidez promedio es menor a 250 NTU, a excepción de marzo 2017.

Figura 50.

Resultados de la turbidez mensual promedio 2017 – 2018.



Los resultados del monitoreo realizado en el mes de enero se presentan en la Tabla 33 y en un gráfico de líneas mostrado en la Figura 51.

Tabla 33.

Resultados del monitoreo de turbidez enero y parte de febrero

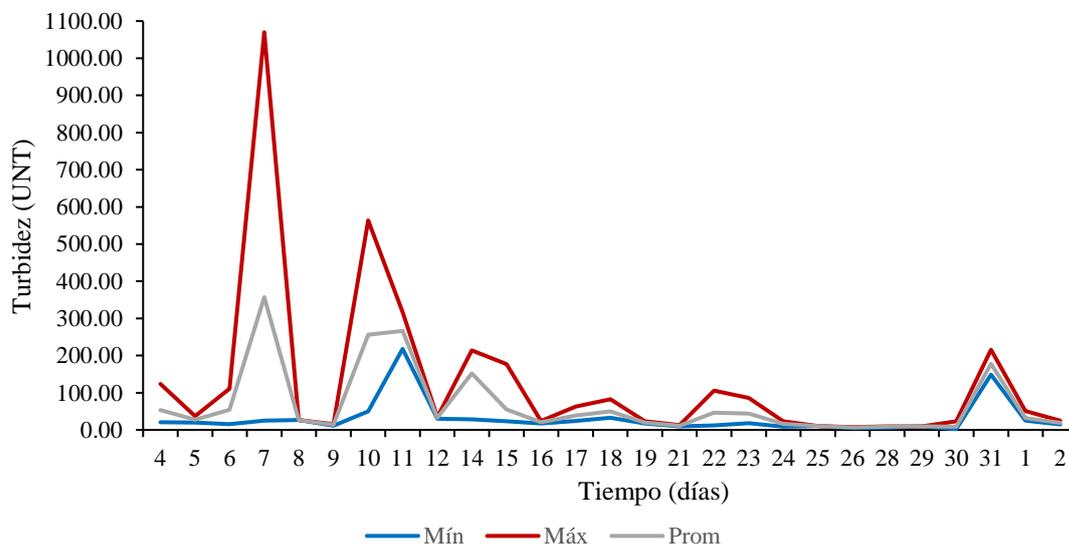
Fecha (enero)	Turbidez (UNT)		
	Mín.	Máx.	Prom
4	20.90	124.00	53.55
5	20.20	37.40	27.35
6	15.90	111.00	54.45
7	25.20	1070.00	357.30
8	26.50	26.500	26.500
9	10.90	15.78	13.84
10	50.00	564.00	256.20
11	218.00	317.00	266.80
12	30.30	34.46	32.43
14	28.65	214.00	152.53
15	23.00	177.00	55.22
16	16.96	23.94	20.42
17	23.97	63.00	38.48
18	32.74	82.88	50.20
19	17.11	23.41	20.18
21	9.43	12.79	11.51
22	12.31	106.00	46.53
23	18.03	86.00	43.98
24	9.07	22.97	16.12
25	10.03	10.73	10.40
26	5.67	7.72	6.67
28	6.22	9.75	8.36
29	9.21	9.76	9.40
30	2.34	23.60	8.78
31	149.00	216.00	177.60
1febrero	25.12	50.44	32.02

2 febrero	14.63	25.25	19.21
Promedio	30.79	128.35	67.26

La SUNASS (2004b) declara que existe una relación entre la magnitud del incremento del caudal, de las precipitaciones, y el incremento de turbidez. De esta manera, la probabilidad de que aumente la turbidez es mayor cuando el aumento de caudal va asociado a un episodio de lluvias. Según el SENAMHI (2019b), Villa Rica en el mes de enero presenta altos niveles de precipitación y el caudal de los ríos crece significativamente provocando un mayor arrastre de sedimentos, en consecuencia los niveles de turbidez son elevados (SENAMHI, 2019d, 2019c). En la Tabla 33 y la Figura 51 se observa que los valores de turbidez son elevados presentando valores máximos de 1070 UNT y turbidez promedio de 67.26 UNT.

Figura 51.

Resultados del monitoreo de turbidez – enero y parte de febrero 2019



En la Figura 51 se puede observar los picos de turbidez que se registraron el día 7, 10, 14, 18, 22 y 31 de enero, esto coincide con el registro del dos datos hidrometeorológicos del SENAMHI es debido a las intensas lluvias producidas en esos días (SENAMHI, 2019b).

4.6.2. *Turbidez en la salida de las unidades de tratamiento enero y parte de febrero*

Los resultados del monitoreo de la turbidez realizados en las unidades de la planta se muestran en la Tabla 34 y la Figura 52

La turbidez tiene una gran importancia sanitaria, ya que refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación, es importante llevar un control del nivel de turbidez en las unidades de tratamiento para conocer la eficiencia de cada unidad, en caso de colmatación se sabe que la eficiencia de tratamiento se reduce por lo que indica que es necesario la limpieza y desinfección de la unidad (Marcó, Azario, Metzler, & García, 2004).

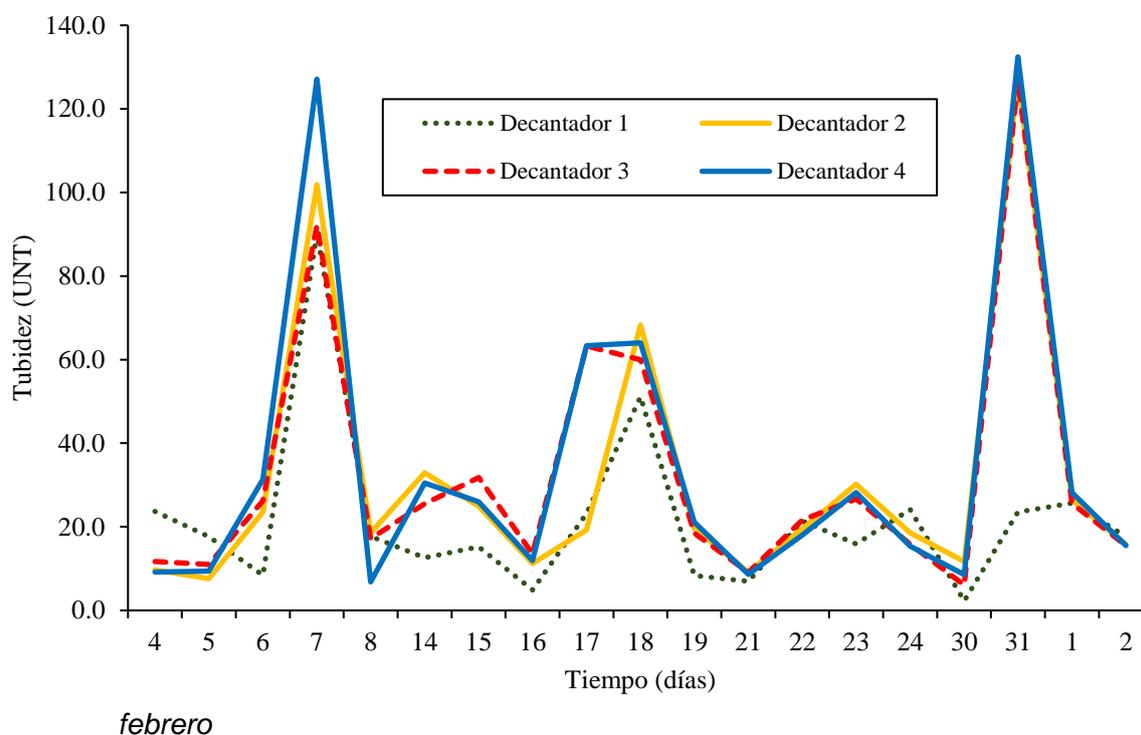
Tabla 34.

Resultados de monitoreo de turbidez en las unidades de la PTAP en enero y parte de febrero

DIA	Entrada			Decantador N°1			Decantador N°2			Decantador N°3			Decantador N°4			Filtros		
	Máy.	Mín.	Prom	Máy.	Mín.	Prom	Máy.	Mín.	Prom	Máy.	Mín.	Prom	Máy.	Mín.	Prom	Máy.	Mín.	Prom
4	124.0	20.9	53.6	29.3	18.1	23.7	15.9	3.6	9.7	11.7	11.7	11.7	18.6	2.5	9.1	29.1	7.4	14.4
5	37.4	20.2	27.4	29.3	6.0	17.7	15.9	3.3	7.6	11.0	11.0	11.0	18.6	2.5	9.4	3.1	3.1	3.1
6	111.0	15.9	54.5	13.1	5.0	8.4	49.6	7.4	23.6	47.6	6.0	26.2	74.6	6.8	31.3	32.2	5.1	14.0
7	1070.0	25.2	357.3	313.0	11.2	90.2	361.0	7.6	101.8	326.0	5.0	92.1	467.0	5.1	127.1	67.0	7.2	25.2
8	26.5	26.5	26.5	17.7	17.7	17.7	18.6	18.6	18.6	17.2	17.2	17.2	6.8	6.8	6.8	10.0	10.0	10.0
14	214.0	28.7	152.5	35.9	5.0	12.6	53.0	16.2	33.0	37.1	17.2	25.5	52.0	15.0	30.5	36.4	2.6	10.7
15	177.0	23.0	55.2	22.7	6.5	15.2	31.5	15.0	24.9	34.9	27.6	31.8	39.0	15.3	26.0	20.6	8.5	15.8
16	23.9	17.0	20.4	6.4	3.8	4.9	20.0	6.3	11.2	17.3	11.3	13.5	18.4	4.7	12.0	9.1	2.2	5.6
17	63.0	24.0	38.5	28.4	18.9	23.2	29.2	10.5	19.3	72.0	55.7	63.3	70.9	56.6	63.3	27.8	14.9	22.2
18	82.9	32.7	50.2	77.0	40.9	51.1	69.3	67.0	68.3	70.0	50.4	60.0	86.0	54.1	64.0	52.0	27.4	37.2
19	23.4	17.1	20.2	10.2	6.3	8.3	24.8	13.8	19.6	19.9	17.3	18.5	27.5	16.6	21.1	27.0	12.6	17.6
21	12.8	9.4	11.5	11.2	2.6	7.0	11.7	7.0	9.2	13.3	5.6	9.1	13.5	6.9	8.6	6.9	3.7	4.7
22	106.0	12.3	46.5	63.0	3.0	21.4	41.7	5.6	19.5	51.0	6.7	21.7	38.7	4.0	18.0	19.8	1.8	8.5
23	86.0	18.0	44.0	39.7	4.6	15.9	50.0	19.9	30.2	53.0	14.5	26.7	50.0	19.6	28.2	19.9	11.1	14.2
24	23.0	9.1	16.1	30.9	11.7	23.0	24.9	14.5	18.6	23.6	5.4	14.8	24.9	7.8	15.4	17.0	5.5	9.9
25	10.7	10.0	10.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	7.7	5.7	6.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	9.8	6.2	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	9.8	9.2	9.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	23.6	2.3	8.8	2.3	2.3	2.3	11.7	11.7	11.7	6.1	6.1	6.1	8.6	8.6	8.6	12.2	1.9	4.4
31	216.0	149.0	177.6	51.9	6.0	23.6	171.6	90.0	127.3	144.1	108.0	126.8	138.9	123.7	132.4	19.1	5.4	13.5
1	50.4	25.1	32.0	29.3	22.4	25.6	36.0	22.2	26.4	40.0	18.2	25.6	45.0	21.3	28.2	22.3	17.6	19.6
2	25.3	14.6	19.2	24.6	11.2	17.6	22.2	9.5	15.9	21.2	11.4	15.5	22.6	9.4	15.5	20.5	10.3	14.7

Figura 52.

Resultados de la variación de la turbidez en los decantadores en enero y parte de



La Figura 54 se presenta un gráfico de líneas donde cada una de ellas representa la variación de los niveles de turbidez a la salida de cada uno de los cuatro decantadores durante el mes de enero. Los resultados muestran que el decantador 1 presenta mayor porcentaje de remoción ya que sus niveles de turbidez son relativamente bajos a comparación de las otras unidades, de acuerdo a la bibliografía consultada, esto básicamente es causado porque la distribución de los caudales no se realiza de manera homogénea, esto hace que en cada decantador existan diferentes tiempos de retención y porcentajes de remoción. Los resultados obtenidos indican que el ingreso del caudal al decantador 1 es menor por lo que presenta mayor tiempo de retención, esto favorece la decantación de los flocs, en la Figura 53 y 54 se puede observar que el decantador uno presenta mayor claridad de agua a diferencia de los otros decantadores (CEPIS, 2006; IWA, 2019b; Maldonado, 2004b).

Figura 53.

Comparación visual de los niveles de turbidez en los decantadores



Nota. Vista fotográfica de los decantadores, comenzando desde el lado superior izquierdo al lado inferior derecho se observan los decantadores 1 al 4, en ese orden respectivo.

Figura 54.

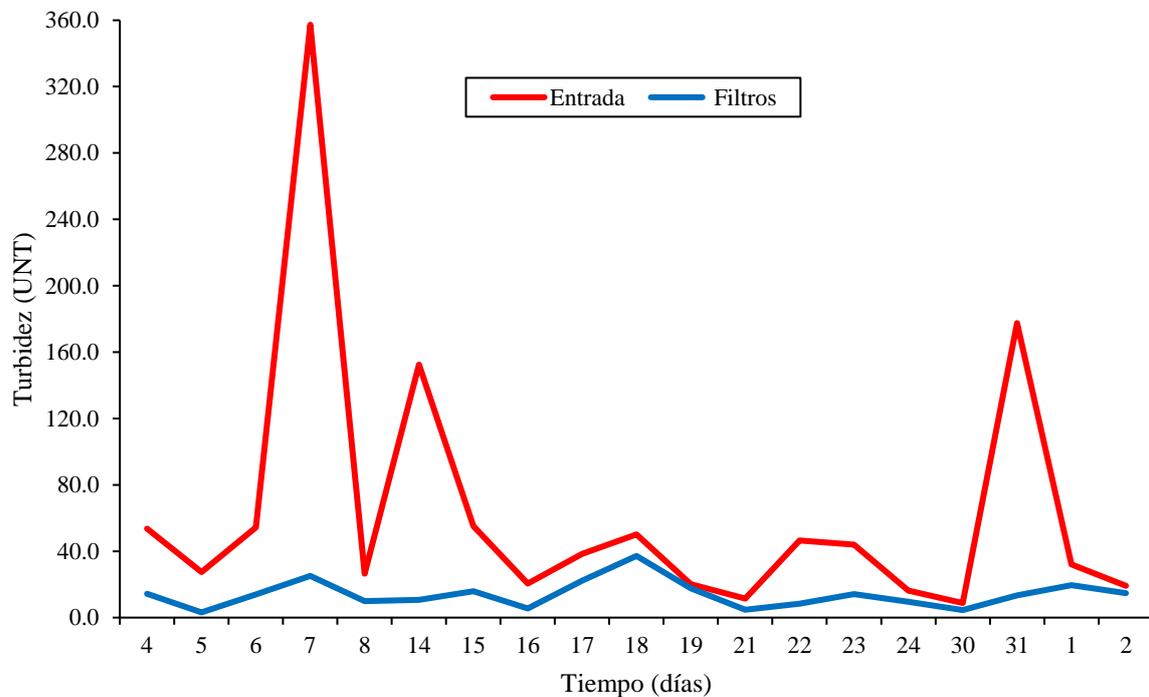
Comparación visual de la turbidez en los decantadores



Nota. Vista fotográfica, el decantador N°1 (lazo inferior izquierdo) presenta agua con menor turbidez respecto a los demás decantadores.

Figura 55.

Resultados de la variación del nivel de turbidez entrada-filtrada en el mes de enero



y parte de febrero

El resultado de la variación del nivel de turbidez en la entrada respecto a la turbidez de salida de agua tratada se presenta en un gráfico de líneas. En la Figura 55 se aprecia una comparación del nivel de turbidez del afluente y efluente de la planta de tratamiento de agua, claramente existe remoción, sin embargo, dichos resultados no cumplen con el reglamento de calidad de agua para consumo humano.

Marcó et al. (2004) mencionan que la causa de la turbidez del agua de consumo puede deberse a un tratamiento insuficiente en la planta de potabilización por inadecuada dosificación o aplicación del insumo químico, incorrecto diseño de las unidades de tratamiento o por la falta de operación y mantenimiento de las unidades, también considera que es importante su remoción ya que elevados niveles de turbidez

pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro.

4.7. Resultados del monitoreo de color en la planta en el mes de enero y parte de febrero

4.7.1. Color en el afluente

De acuerdo a los monitoreos realizados, otro de los parámetros que más sobrepasa el límite máximo permisible es el color del agua, la Tabla 35 muestra los resultados del monitoreo diario de color en los años 2016 y 2017, muestran valores muy altos de en el ingreso al tratamiento. Naturalmente el patrón de variación de color durante el tiempo de monitoreo es similar al de la turbidez, esto se debe a que según algunos autores la turbidez del agua está relacionada con el color (Hui, Djati, & Zhi, 2011; Tan, Thishalini, Goh, & Edlic, 2017).

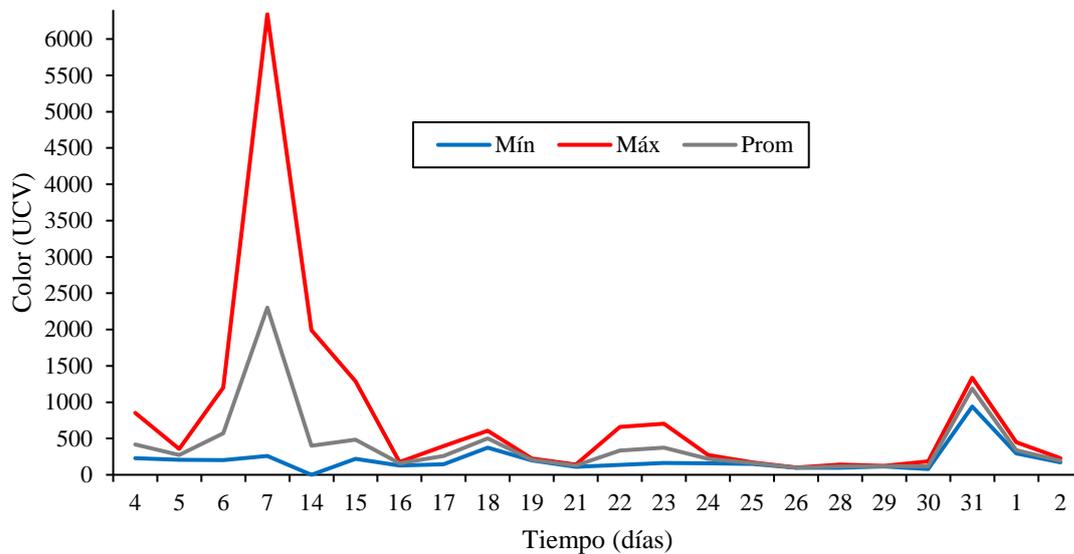
Tabla 35.

Resultados del monitoreo de color enero y parte de febrero

Fecha (enero)	Color (UCV)		
	Mín.	Máx.	Prom
4	227	854	418.0
5	207	356	272.8
6	202	1200	570.8
7	259	6340	2301.8
8	299	299	299.0
14	-	1992	398.4
15	218	1288	484.0
16	129	176	158.8
17	144	394	258.8
18	375	605	501.4
19	199	223	207.7
21	109	139	127.4
22	135	660	335.4
23	164	702	374.4
24	158	273	218.8
25	150	173	163.4
26	98	100	99.3
28	96	139	113.6
29	115	121	118.4

30	77	185	118.4
31	940	1336	1185.0
1 febrero	295	450	336.8
2 febrero	172	230	194.0
Promedio	207.3	792.83	402.45

Figura 56.



Resultados del monitoreo de color – enero y parte de febrero 2019

En la Figura 56 se muestra un incremento considerable de color los días del 6 al 15, en los cuales se registran valores máximos superiores a 1000 con un pico de 6000 UCV en el día 7. Respecto a esto, los datos registrados por la estación meteorológica del SENAMHI ubicada en Oxapampa muestran que la variación en las precipitaciones registradas en el mes de enero presentan un patrón similar pues se registraron valores entre 20 y 35 mm/día durante los días del 5 y 15 de enero, asimismo, en el gráfico se observan cambios en color del agua los días 22, 23 y 31 estas variaciones también están relacionadas al comportamiento de la precipitación registrada por el SENAMHI, los registros de la estación meteorológica de Oxapampa se pueden observar detalladamente en el anexo 4.

4.7.2. Color en la salida de las unidades de tratamiento

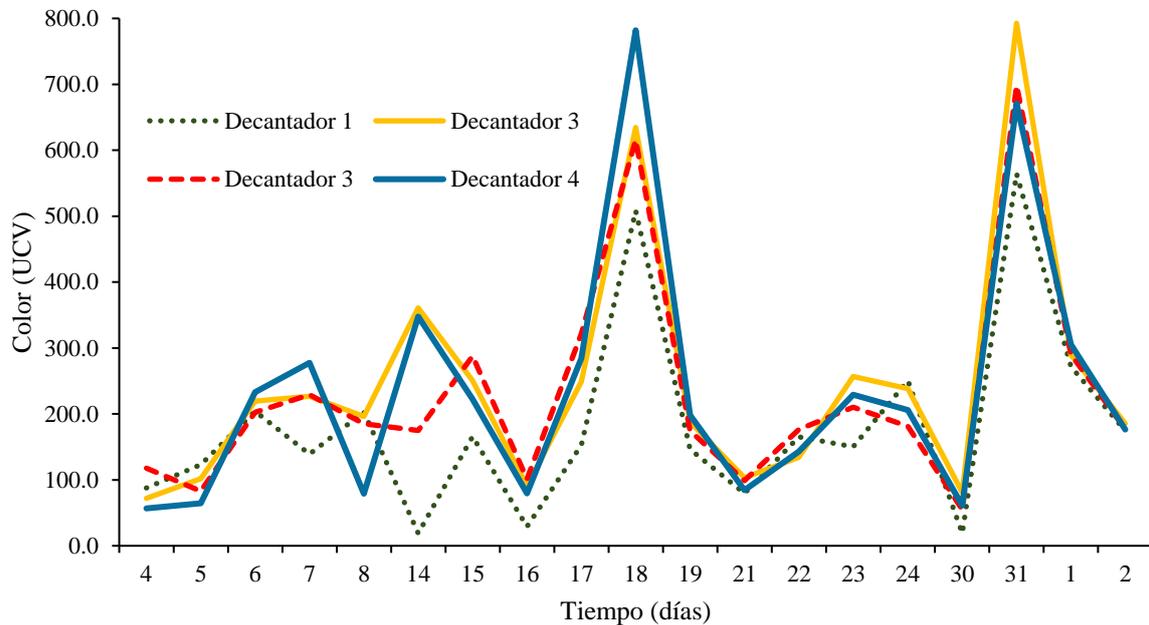
En la Tabla 36 se muestran los resultados máximos, mínimo y promedio del monitoreo de color realizados en la salida de las unidades de tratamiento.

Tabla 36. Resultados de monitoreo de color en las unidades de la PTAP

Día	Entrada			Decantador N° 1			Decantador N° 2			Decantador N° 3			Decantador N° 4			Filtros		
	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom
4	854.0	227.0	418.0	131.0	17.0	87.7	126.0	18.0	72.0	205.0	50.0	118.0	85.0	38.0	56.8	201.0	5.0	81.0
5	356.0	207.0	256.3	131.0	115.0	123.0	126.0	78.0	102.0	157.0	50.0	82.8	85.0	50.0	64.3	76.0	76.0	76.0
6	1200.0	202.0	570.8	440.0	82.0	204.0	390.0	100.0	219.5	384.0	90.0	202.8	474.0	130.0	233.0	244.0	77.0	122.8
7	6340.0	259.0	2301.8	190.0	83.0	139.0	520.0	71.0	226.5	544.0	44.0	229.0	724.0	38.0	277.5	150.0	77.0	106.3
8	299.0	299.0	299.0	203.0	203.0	203.0	196.0	196.0	196.0	185.0	185.0	185.0	79.0	79.0	79.0	142.0	142.0	142.0
14	1992.0	1992.0	1992.0	19.0	19.0	19.0	361.0	361.0	361.0	175.0	175.0	175.0	348.0	348.0	348.0	0.0	0.0	0.0
15	1288.0	218.0	484.0	353.0	19.0	165.8	402.0	153.0	250.4	376.0	151.0	287.6	394.0	81.0	222.4	211.0	29.0	150.4
16	176.0	129.0	158.8	43.0	17.0	29.2	133.0	55.0	90.4	127.0	73.0	101.2	135.0	34.0	79.4	60.0	9.0	35.2
17	394.0	144.0	258.8	175.0	120.0	152.4	297.0	210.0	248.8	434.0	243.0	321.6	353.0	235.0	284.2	185.0	86.0	128.2
18	605.0	375.0	501.4	716.0	368.0	508.0	694.0	581.0	634.4	748.0	506.0	615.8	980.0	676.0	782.0	494.0	393.0	460.0
19	223.0	199.0	207.7	247.0	81.0	146.3	245.0	154.0	188.0	204.0	149.0	174.7	234.0	176.0	198.3	267.0	119.0	172.0
21	139.0	109.0	127.4	137.0	35.0	79.6	130.0	74.0	103.0	137.0	65.0	98.8	131.0	40.0	84.2	82.0	55.0	66.8
22	660.0	135.0	335.4	412.0	37.0	165.2	243.0	40.0	134.4	330.0	81.0	176.2	250.0	37.0	142.8	160.0	26.0	80.0
23	702.0	164.0	374.4	396.0	45.0	150.0	451.0	172.0	256.8	442.0	137.0	210.2	433.0	154.0	229.2	148.0	86.0	114.6
24	273.0	158.0	218.8	313.0	161.0	250.6	293.0	179.0	238.5	273.0	69.0	181.0	280.0	92.0	206.0	220.0	79.0	136.6
25	173.0	150.0	163.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	100.0	98.0	99.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	139.0	96.0	113.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	121.0	115.0	118.4															
30	185.0	77.0	118.4	19.0	19.0	19.0	81.0	81.0	81.0	55.0	55.0	55.0	61.0	61.0	61.0	169.0	24.0	83.8
31	1336.0	940.0	1185.0	978.0	57.0	564.3	824.0	766.0	792.7	735.0	654.0	698.3	738.0	598.0	671.0	180.0	138.0	159.0
1	450.0	295.0	336.8	292.0	254.0	272.0	331.0	255.0	289.8	367.0	249.0	290.4	364.0	285.0	305.0	248.0	222.0	236.0
2	230.0	172.0	194.0	217.0	153.0	174.3	230.0	158.0	185.3	217.0	155.0	177.0	211.0	158.0	176.3	211.0	147.0	169.7

Figura 57.

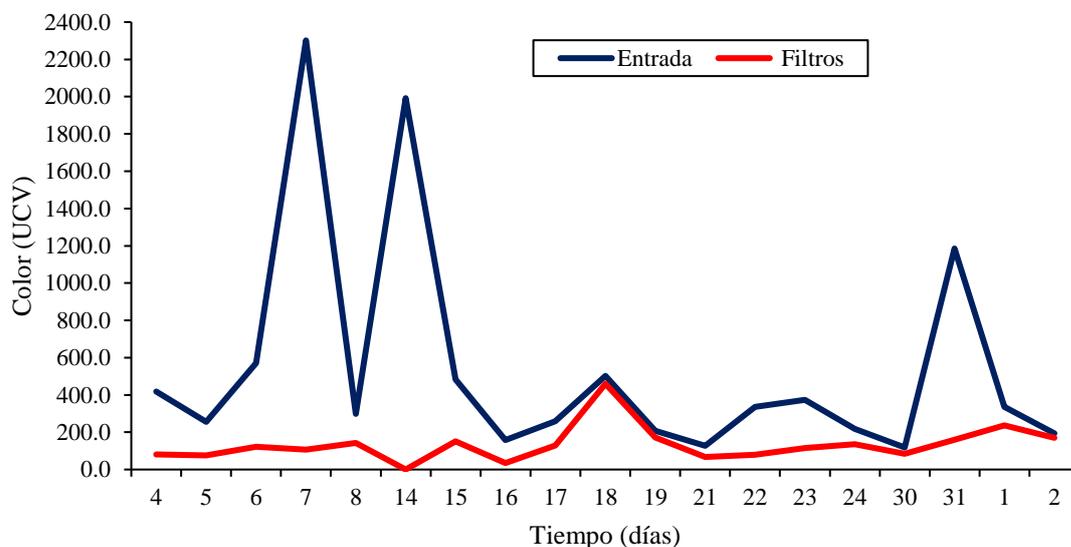
Resultado de la variación del nivel de color en los decantadores



En la Figura 57 se muestra un gráfico de líneas donde se observan los resultados del monitoreo de color a la salida de los decantadores realizados por recomendación del CEPIS. Se observa que en cada decantador los resultados son diferentes siendo el decantador 1 el que logra mejores resultados, respecto a esto, el CEPIS (2006) establece que si hay decantadores que operan paralelamente deben tener un comportamiento similar y sólo se puede lograr si todos los decantadores reciben caudales iguales, de lo contrario el tiempo de retención hidráulica y la tasa de operación de cada uno de ellos no es uniforme y su eficiencia se verá afectada. Dicho esto, es importante expresar que el canal de distribución de agua floculada no está diseñado de manera adecuada y no distribuye el caudal uniformemente por lo que una de las principales causas de la variación del color en los diferentes decantadores.

Figura 58.

Resultados de la variación del nivel de color entrada-salida de filtros



En la Figura 58 se presenta un gráfico de líneas en el que se compara los niveles de color del agua que ingresó a la PTAP. Tomando los promedios de color de la Tabla 36 se observa que se logró reducir de 471 UCV a 132.6 UCV, sin embargo, Pacheco (2005) menciona que, al salir de la filtración, la concentración máxima no debe ser mayor a 5 UCV, de manera que no se cumple con lo deseado. Esto se debe a los errores de diseño en las unidades de la planta.

4.8. Resultados del monitoreo de la temperatura del agua en el mes de enero y parte de febrero

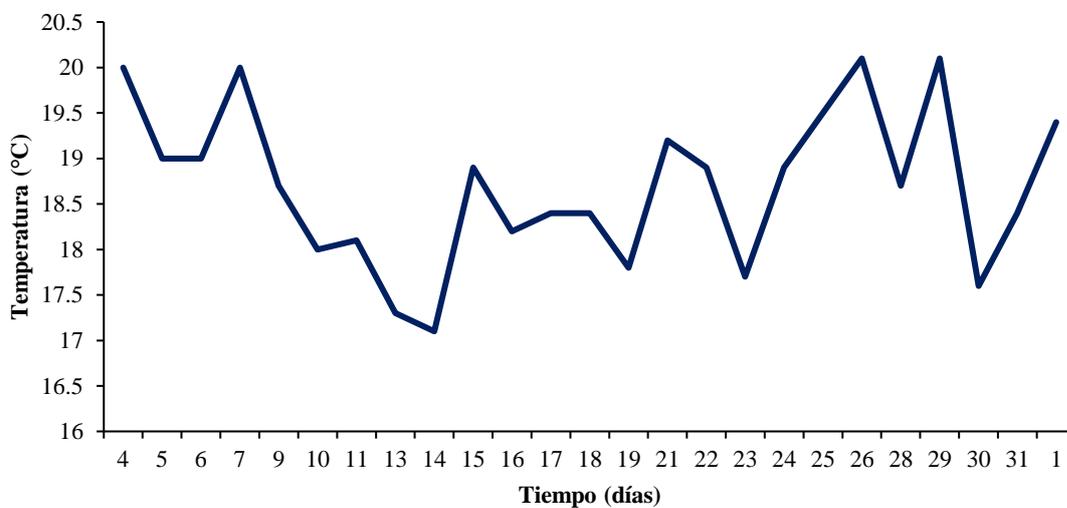
Los resultados de monitoreo de la temperatura del afluente se presentan en un gráfico de líneas. La temperatura juega un papel muy importante en la disolución de las sales y por lo tanto en la conductividad eléctrica (Andía, 2000; Arboleda, 2000).

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la

coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc. En la Figura 59 se observa que la temperatura oscila entre los 17 y 20 ° C resultados muy variables por lo que podría ser uno de los factores que dificulta el proceso de remoción

Figura 59.

Monitoreo de temperatura del agua – enero 2019



4.9. Resultados del monitoreo del pH del agua

Los resultados del monitoreo de pH se presentan en la Tabla 37. De acuerdo a Andía (2000) y Orellana (2005), el pH es uno de los parámetros más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para el cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH está en función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto, la dosis requerida es alta. Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0. En los resultados del monitoreo

presentados en la Tabla 37 los valores del pH varían entre 6.5 -8.5 rango óptimo para la aplicación del sulfato de aluminio.

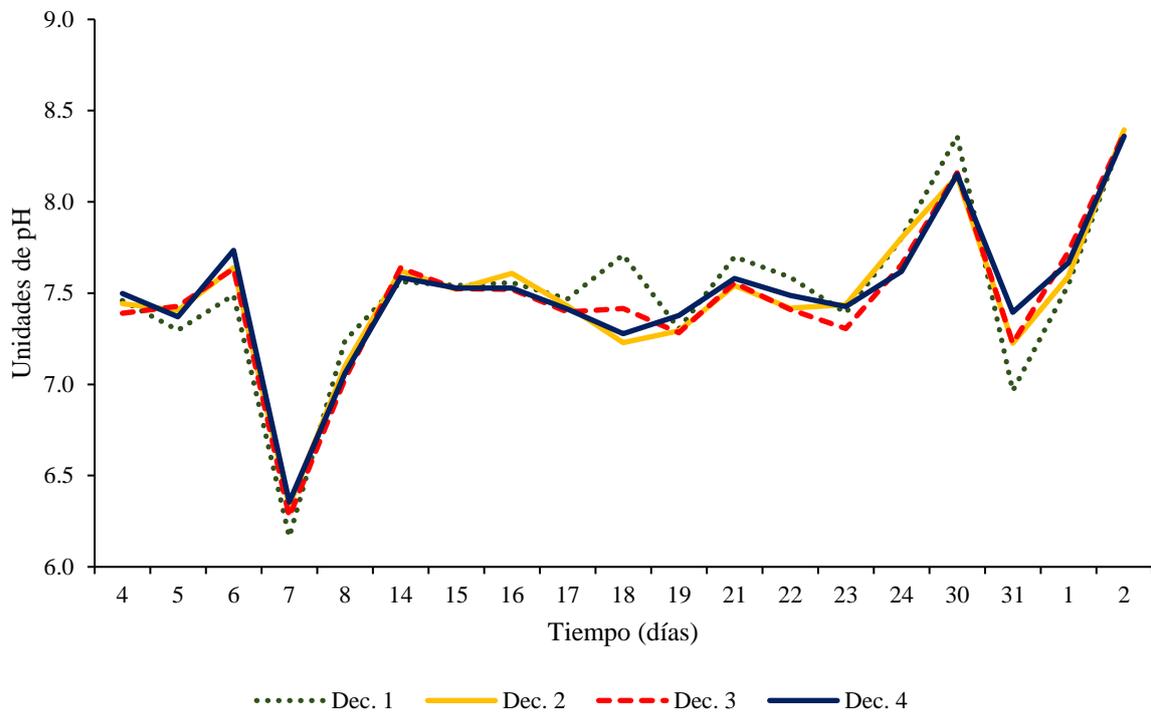
Tabla 37.

Resultados de monitoreo de pH en las unidades de la PTAP

Día	Entrada			Decantador N°1			Decantador N°2			Decantador N°3			Decantador N°4			Filtros		
	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom	Máx.	Mín.	Prom
4	8.5	8.1	8.4	8.0	7.2	7.5	7.9	7.1	7.4	7.7	7.1	7.4	7.9	7.3	7.5	7.9	7.6	7.8
5	8.5	8.1	8.4	7.5	7.2	7.3	7.7	7.1	7.4	7.7	7.1	7.4	7.6	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4
6	8.3	8.3	8.3	7.7	7.3	7.5	7.9	7.4	7.6	7.7	7.6	7.6	7.8	7.6	7.7	8.0	7.7	7.8
7	7.7	7.6	7.6	7.2	5.1	6.2	7.3	5.4	6.3	7.3	5.2	6.3	7.3	5.4	6.4	7.2	5.9	6.6
8	8.1	8.1	8.1	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	7.0	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2
14	8.5	8.1	8.4	7.7	7.5	7.6	7.8	7.5	7.6	7.7	7.5	7.6	7.6	7.5	7.6	7.6	7.2	7.4
15	8.5	8.1	8.2	7.9	7.2	7.5	7.8	7.2	7.5	7.8	7.2	7.5	7.8	7.3	7.5	7.8	7.3	7.5
16	8.4	7.9	8.2	7.8	7.3	7.6	7.9	7.4	7.6	8.0	7.3	7.5	7.7	7.4	7.5	7.9	7.3	7.6
17	8.5	8.0	8.3	7.9	7.1	7.5	7.6	7.1	7.4	7.6	7.1	7.4	7.6	7.3	7.4	7.6	7.2	7.3
18	8.4	8.0	8.2	8.7	7.1	7.7	7.6	6.7	7.2	7.8	6.7	7.4	7.7	6.7	7.3	7.8	6.8	7.4
19	8.1	7.8	7.9	7.4	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.4	7.2	7.3	7.4	7.3	7.4	7.7	7.5	7.5
21	8.6	8.0	8.3	8.0	7.5	7.7	8.0	7.3	7.5	8.0	7.3	7.6	7.9	7.2	7.6	8.1	7.2	7.7
22	8.4	8.0	8.3	8.0	7.1	7.6	7.6	7.0	7.4	7.5	7.1	7.4	7.5	7.4	7.5	8.1	7.6	7.8
23	8.5	7.9	8.2	7.5	7.2	7.4	7.7	7.3	7.4	7.5	7.2	7.3	7.8	7.2	7.4	7.6	7.2	7.4
24	8.9	8.2	8.4	8.1	7.6	7.8	8.1	7.5	7.8	8.1	7.3	7.7	8.1	7.1	7.6	7.9	7.3	7.7
25	8.5	8.4	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	8.5	8.5	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	8.6	8.5	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	8.6	8.5	8.6															
30	8.6	8.4	8.5	8.4	8.4	8.4	8.1	8.1	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.4	8.2	8.3
31	8.3	8.2	8.2	7.0	6.9	7.0	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.4	7.4	7.4	7.3	7.3	7.3
1	8.2	8.2	8.2	7.6	7.5	7.5	7.7	7.5	7.6	7.8	7.6	7.7	7.8	7.6	7.7	7.7	7.5	7.6
2	8.5	8.5	8.5	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.3	8.4	8.4	8.3	8.3

Figura 60.

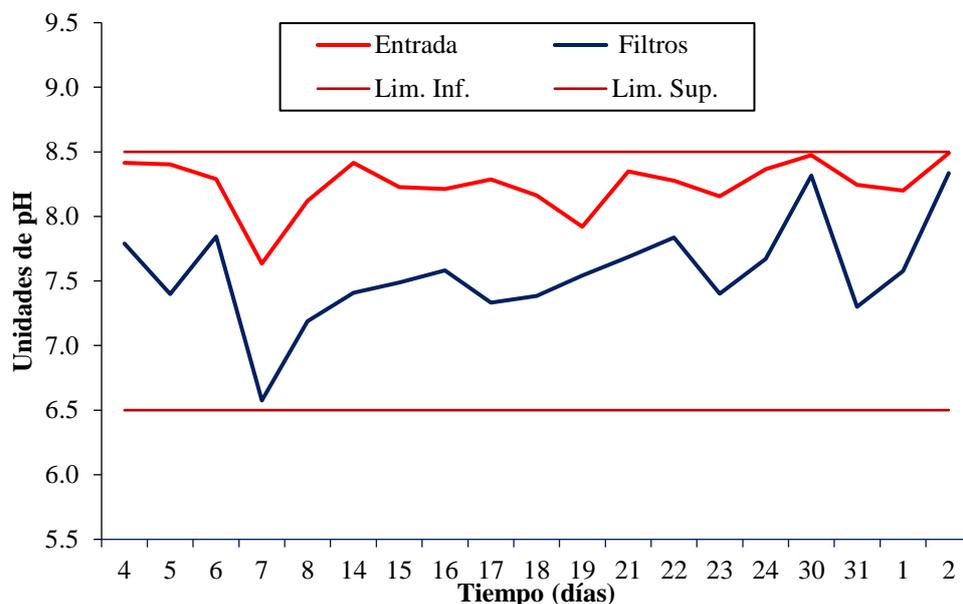
Resultados de la variación del nivel de pH en los decantadores



En la Figura 60 se observa la variación de los niveles de pH en los decantadores, en los gráficos observamos que los rangos de pH se encuentran dentro de los límites establecidos por el reglamento de calidad de agua para consumo humano.

Figura 61.

Variación del nivel de pH entrada-filtrada



En la Figura 61 se observa la variación del pH, el afluente presenta un mayor valor de pH después del proceso de tratamiento el pH tiende a bajar; sin embargo, los rangos de pH se encuentran dentro de los valores establecidos en el reglamento de calidad de agua.

4.10. Resultados del nivel de conductividad en el agua

En la Tabla 38 se muestran los resultados de monitoreo de la conductividad en la entrada y en la salida de la PTAP.

Tabla 38.

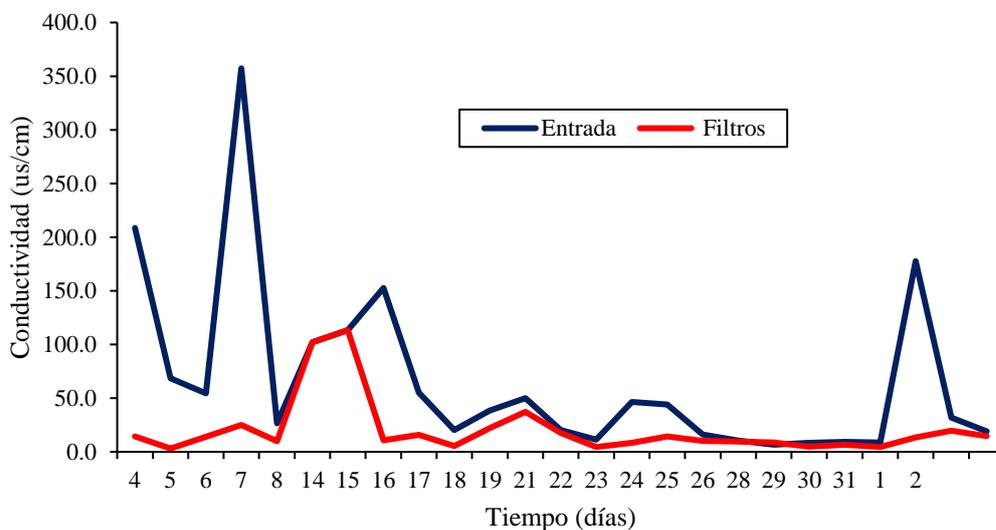
Resultados de monitoreo de conductividad en la entrada y en la salida de la PTAP

Día	Entrada			Filtros		
	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom
4	317.0	34.5	208.6	29.1	7.4	14.4
5	182.0	28.7	68.4	3.1	3.1	3.1
6	111.0	15.9	54.5	32.2	5.1	14.0
7	1070.0	25.2	357.3	67.0	7.2	25.2
8	26.5	26.5	26.5	10.0	10.0	10.0
11	130.0	80.0	102.0	130.0	80.0	102.0
12	120.0	110.0	113.3	120.0	110.0	113.3
14	214.0	28.7	152.5	36.4	2.6	10.7
15	177.0	23.0	55.2	20.6	8.5	15.8
16	23.9	17.0	20.4	9.1	2.2	5.6
17	63.0	24.0	38.5	27.8	14.9	22.2
18	82.9	32.7	50.2	52.0	27.4	37.2

19	23.4	17.1	20.2	27.0	12.6	17.6
21	12.8	9.4	11.5	6.9	3.7	4.7
22	106.0	12.3	46.5	19.8	1.8	8.5
23	86.0	18.0	44.0	19.9	11.1	14.2
24	23.0	9.1	16.3	17.0	5.5	10.0
25	10.7	10.0	10.4	-	-	-
26	7.7	5.7	6.7	-	-	-
28	9.8	6.2	8.4	-	-	-
29	9.8	9.2	9.4	-	-	-
30	23.6	2.3	8.8	12.2	1.9	4.4
31	216.0	149.0	177.6	19.1	5.4	13.5
1	50.4	25.1	32.0	22.3	17.6	19.6
2	25.3	14.6	19.2	20.5	10.3	14.7

Figura 62.

Resultados de la variación del nivel de conductividad entrada-filtrada



En la Figura 62 se presenta un gráfico de líneas que representa el comportamiento la variación de la conductividad de la entrada y la salida de la planta de tratamiento de agua potable. En la entrada de la PTAP se registraron valores mayores a 200 ms/cm en promedio y a la salida se registró una media menor a 100 ms/cm cumpliendo con el LMP que establece que el agua para consumo humano

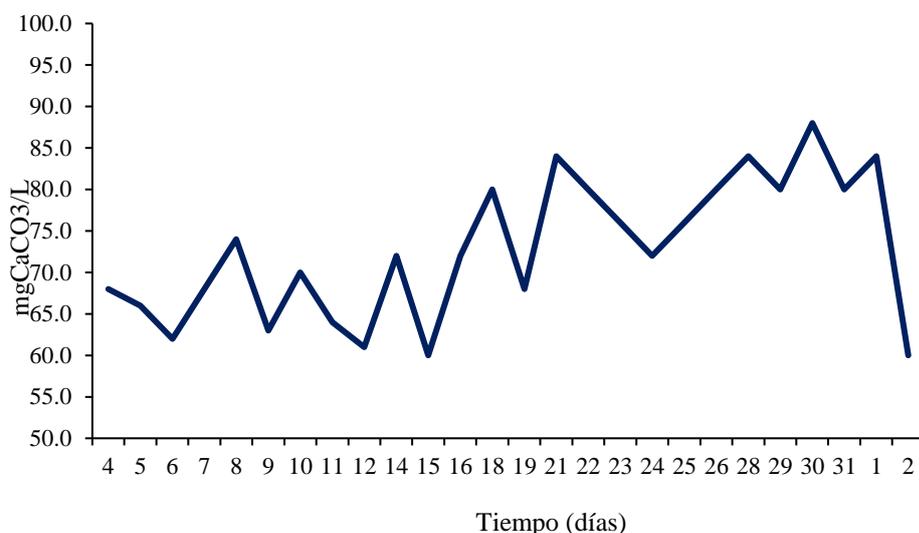
debe tener una conductividad menor a 1500 mmho; cabe precisar además que 1 mmho/cm es igual a 1ms/cm. Segura (2012) afirma que niveles de conductividad comprendidos entre 0 y 250 ms/cm tienen un nivel de riesgo bajo. Ya que el agua tratada que sale de la PTAP cumple con la remoción de este parámetro, se puede afirmar que el proceso de tratamiento es eficiente porque la cantidad de iones o cationes presentes en el agua es un indicador de pureza (Comisión Nacional del Agua, 2016).

4.11. Resultados del nivel de la alcalinidad del afluente

En la Figura 63 se presenta un gráfico de líneas que representa la variación de la alcalinidad o dureza del agua en el ingreso a la PTA, los resultados muestran que la alcalinidad varía entre 60 mgCaCO/L y 88 mgCaCO/L, el CEPIS (2006) señala que el agua debe tener cierto grado de alcalinidad que favorezca la coagulación, tanto así que cada mg/L de Sulfato de aluminio actúa con 0.45 mg/L de alcalinidad. Esto se debe a que en el momento de mayor agitación en la mezcla rápida se produce una reacción entre la alcalinidad con el sulfato de aluminio originándose hidróxidos gelatinosos (flocs) que remueven la turbidez del agua; asimismo se producen iones de cargas eléctricas positivas que atraen y neutralizan a los coloides que por lo general están cubiertos por una capa con carga negativa, esto propicia la remoción de color en el agua (CEPIS, 2002).

Figura 63.

Resultados del monitoreo de alcalinidad en el ingreso de la planta



El reglamento de calidad de agua establece un límite de 500 mgCaCO₃/L para agua con fines de consumo humano, en la Figura 63 se observa que la dureza del agua no supera el LMP, sino que en promedio alcanza 72 mgCaCo/L por lo cual se considera como agua blanda (Molada, 2006).

4.12. Resultados de la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio granulado tipo A) respecto a turbidez en la fuente

En la Tabla 39 se presentan los resultados de dosis óptimas obtenidas para las distintas muestras de agua que fueron usadas para realizar pruebas de tratabilidad en laboratorio.

Tabla 39.

Resultado de las dosis óptimas para cada muestra de agua en la PTAP

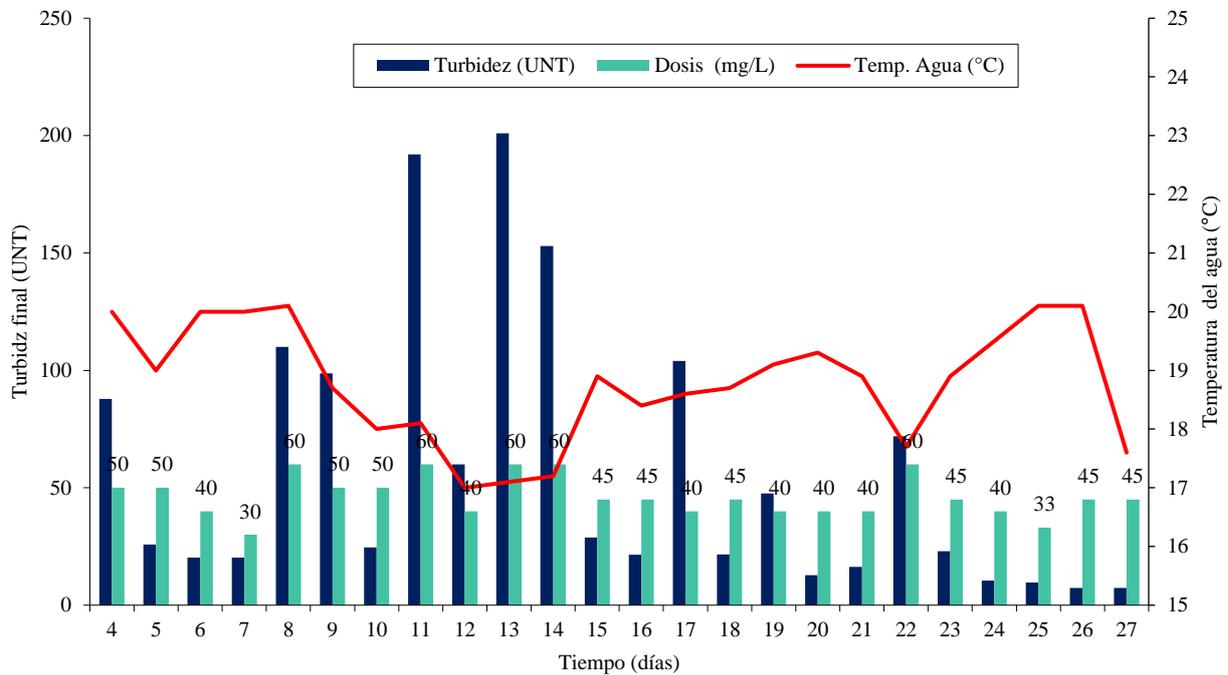
Fecha	Turbidez UNT	Color UCV	Temp. Agua °C	Dosis (mg/L)	Turbidez Final (UNT)
4	87.9	641	20	50	3.53
5	25.8	279	19	50	5.35
6	20.2	187	20	40	8.82
7	20.2	230	20	30	5.19
8	110	878	20.1	60	8.5

9	98.73	680	18.7	50	3.46
10	24.67	243	18	50	4.73
11	192	549	18.1	60	10.14
12	60	345	17	40	12.46
13	201	849	17.1	60	13.03
14	153	489	17.2	60	16
15	28.8	234	18.9	45	6.47
16	21.53	165	18.4	45	6.31
17	104	852	18.6	40	7.77
18	21.59	162	18.7	45	8.31
19	47.65	500	19.1	40	5.71
21	12.79	134	19.3	40	6.26
22	16.3	137	18.9	40	9.33
23	72	712	17.7	60	8.86
24	22.97	273	18.9	45	4.67
25	10.45	159	19.5	40	4.16
26	9.72	122	20.1	33	8.32
27	7.29	110	20.1	45	4.23
28	7.39	90	17.6	45	12.13

Los resultados muestran que las dosis de coagulante aplicadas varían entre 33 y 60 mg/L asimismo, la turbidez y color junto con la temperatura influyen sobre el incremento o disminución de la dosis aplicada.

Figura 64.

Resultados de las dosis optimas para cada muestra de agua en la PTAP



En la Figura 64 se muestra un gráfico de barras y líneas, los resultados indican que mientras disminuye la temperatura, la dosis requerida aumenta, esto se debe a que la temperatura modifica la densidad del agua, por otro lado, las energías cinéticas de las partículas en suspensión varían; al descender la temperatura, se ralentiza la coagulación, asimismo temperaturas muy altas tampoco son favorables (Andía, 2000).

Temperaturas inferiores a 10°C no son favorables para la remoción de turbidez, por el contrario, entre 20°C y 40°C la eficiencia es superior a mayor temperatura ya que como se mencionó líneas arriba, la tasa de colisión entre partículas se incrementa (Barrenechea, 2004).

Geng (2005) agrega que el agua con menores temperatura disminuye la solubilidad de coagulantes como las sales de aluminio y policloruro de aluminio, incrementa la viscosidad del agua y retarda la cinética de las reacciones de hidrólisis

y floculación de las partículas. También afecta significativamente en la turbidez y el recuento de partículas durante la coagulación, el carbono orgánico disuelto y la eliminación de color no son sensibles a la temperatura, por lo que se observa que a menor temperatura mayor dosis de coagulante, de misma manera con la turbidez

4.13. Resultados de tratabilidad para determinar coagulante y dosis óptima

Las pruebas de tratabilidad se realizaron con los gradientes de velocidad y tiempos de floculación de la PTAP Villa Rica. En la Tabla 40 se muestran los tiempos de floculación y gradientes de velocidad

Tabla 40.

Tiempos y gradientes con los que trabaja la planta

Procesos	Gradiente de velocidad S ⁻¹	RPM	Tiempo
Mezcla rápida		300	00:00:05
	48	38	00:06:30
Mezcla lenta	26	24	00:09:30
	10	12	00:07:00
Sedimentación	0	0	00:10:00

Para las pruebas de tratabilidad se aplicaron sulfato de aluminio granulado tipo A, sulfato de aluminio en solución, cloruro férrico y policloruro de aluminio (PAC). Véase la Tabla 41.

Tabla 41.

Coagulantes químicos aplicados en las pruebas de tratabilidad

Insumos químicos	Concentración	Unidad
Sulfato de Aluminio granulado Tipo A		
Sulfato de Aluminio Tipo A en solución al 8%	2.5	%
Cloruro Férrico		
Policloruro de Aluminio (PAC)		

4.13.1. Resultados de

las pruebas de tratabilidad con una muestra de agua con turbidez baja

Las características de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad se presentan en la Tabla 42, corresponde a la primera muestra con una turbidez baja de 23 UNT.

Tabla 42.

Caracterización de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad

Características del agua cruda		
Alcalinidad inicial	96	CaCO ₃ /l
pH inicial	7.22	Unidades de pH
Turbidez agua cruda	23	UNT
Temperatura del agua	20.08	°C
Color aparente	195	UCV
Color real	153	UCV
Conductividad	110	Us/cm

Tabla 43.

Resultado de la prueba con sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5%

Insumo químico:	Sulfato de aluminio granulado tipo A						
	Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	10	15	20	25	30	35	
Ti (UNT)	14	12	10	11	9	10	
Color Aparente	91	88	67	69	52	59	
Color Real	36	35	29	28	19	23	
pH	7.56	7.59	7.69	7.74	7.73	7.75	
Conductividad (Us/cm)	111	113	113	114	116	115	
Aluminio residual (mg/L)	0.025	0.020	0.012	0.009	0.007	0.009	

En la Tabla 43 se muestran las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante sulfato de aluminio granulado Tipo A a una concentración de 2.5%, con los resultados se puede apreciar que el resultado más óptimo lo presenta el vaso 5 el cual está trabajando con una dosis de 30 mg/L, con el cual se obtiene una turbidez final de 9 UNT y un color real de 19 UCV; el reglamento de calidad de agua para consumo humano establece un valor de turbidez no mayor a 5 UNT y en color no mayor a 15 UCV, por lo tanto, los resultados finales no son aceptables. Andía (2000) y Ramírez (2019) mencionan que el sulfato

de aluminio presenta mayor efectividad en aguas con pH 6 – 8 ya que el aluminio es un metal trivalente, por lo tanto los iones positivos de las sales de aluminio neutralizan efectivamente los iones negativos que componen los sistemas coloidales logrando así mayor eficiencia en la reducción de turbidez en el agua, la muestra cruda presenta un nivel de pH dentro del rango óptimo, según Cerón (2016), el Al^{3+} puede también combinarse con los OH^- del agua para formar hidróxido de Al. Este hidróxido de aluminio es de carácter coloidal, ya que absorbe iones positivos en disolución para formar un sol cargado positivamente, dicho sol neutraliza la carga de los coloides negativos y ayuda a completar la aglomeración, sin embargo, existen otros parámetros determinantes como son Gradientes de velocidad y tiempos de floculación óptimos, por otro lado las concentraciones de aluminio residual del agua cruda se encuentran por debajo de la unidad deseable establecida por el reglamento de calidad de agua para consumo humano..

Tabla 44.

Resultados de la prueba de tratabilidad con sulfato de aluminio Tipo A en solución a una concentración de 2.5%

Insumo químico:	Sulfato de aluminio en solución tipo A					
Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Ti (UNT)	20	21	17	14	16	20
Color Aparente	93	96	68	94	94	132
Color Real	41	42	34	47	46	52
pH	7.54	7.52	7.35	7.45	7.53	7.49
Conductividad (Us/cm)	112	113	112	111	112	114
Aluminio residual (mg/L)	0.020	0.023	0.001	0,002	0.002	0.008

Los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando diferentes dosis de sulfato de aluminio tipo A en solución a una concentración de 2.5 % se presentan en la Tabla 44 donde se puede apreciar que el resultado óptimo alcanza una turbidez de 14 UNT y color real 47 UCV aplicando una dosis de 25 mg/L. Con los resultados se puede

evidenciar que con la aplicación el sulfato de aluminio en solución en este tipo de agua se obtiene un menor porcentaje de remoción a comparación de la prueba aplicando sulfato de aluminio granulado, como resultado final valores por encima de los establecido en el reglamento de calidad de agua para consumo humano.

El sulfato de aluminio granulado Tipo A presenta un mayor porcentaje de óxidos de aluminio, superiores a 16.8, mientras que el sulfato de aluminio en solución presenta un porcentaje entre 7.4 - 7.7, por lo que la concentración de óxidos de aluminio tendría mucha relación con la eficiencia del producto, por otro lado las concentraciones de aluminio residual del agua cruda se encuentran por debajo de la unidad deseable establecida por el reglamento de calidad de agua para consumo humano (Asociación Nacional de la Industria Química, 2015; MINSA, 2011).

Tabla 45.

Resultados de la prueba con cloruro férrico al 2.5%.

Insumo químico: Vasos	Cloruro férrico					
	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Ti (UNT)	20	19	18	15	19	21
Color Aparente (UCV)	142	138	142	123	184	173
Color Real (UCV)	65	60	68	57	79	72
pH	7.49	7.38	7.37	7.36	7.35	7.37
Conductividad (Us/cm)	113	112	111	112	113	114
Hierro residual (mg/L)	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

En la Tabla 45 presentamos las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante cloruro férrico con una concentración al 2.5%, donde se puede apreciar que el resultado más óptimo lo presenta el vaso 4 el cual está trabajando con una dosis de 25 mg/L, obteniendo una turbidez final de 15 UNT y un color real de 57 UCV, dicho coagulante representa un porcentaje de remoción menor a comparación del sulfato de aluminio granulado tipo A arrojando resultados finales que no cumplen los límites que establece el reglamento

de calidad de agua para consumo humano respecto a color y turbidez. Según Rinne (2010) uno de los parámetros importantes para la efectividad del cloruro férrico es el pH ya que tiene un intervalo de pH efectivo que va desde 3.5 a 7.0 y de 8 a 9.5, mientras que el sulfato de aluminio es más efectivo con pH de 6 a 8, la muestra de agua con la que se trabajó en el laboratorio presentaba un nivel de pH de 7.22 razón por la cual se puede afirmar que el cloruro férrico no tuvo mayor eficiencia de remoción de turbidez que el sulfato de aluminio, por otro lado, J. Pérez (2017) agrega que el sulfato de aluminio es el que mejor remueve la turbidez y Tafur (2017) en su investigación realizada con agua de similares características obtuvo que el cloruro férrico no alcanzó mayor remoción que el sulfato de aluminio. En el caso de que se pretenda usar el cloruro férrico en la planta de tratamiento sería necesario implementar una unidad para el ajuste de pH y ello demandaría costos en la construcción de la unidad, la implementación de equipos dosificadores e insumos químicos y sería necesario capacitar al operador en el manejo correcto de este insumo químico.

Tabla 46.

Resultados de la prueba de tratabilidad con Policloruro de aluminio PAC a una concentración de 2.5%.

Insumo químico: Vasos	Policloruro de aluminio PAC					
	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Ti (UNT)	20	18	17	15	12	16
Color Aparente (UCV)	96	92	58	34	34	49
Color Real (UCV)	35	32	27	21	20	31
pH	7.53	7.56	7.59	7.58	7.61	7.59
Conductividad (Us/cm)	114	115	113	115	114	115
Aluminio residual (mg/L)	0.170	0.020	0.023	0.001	0.002	0.008

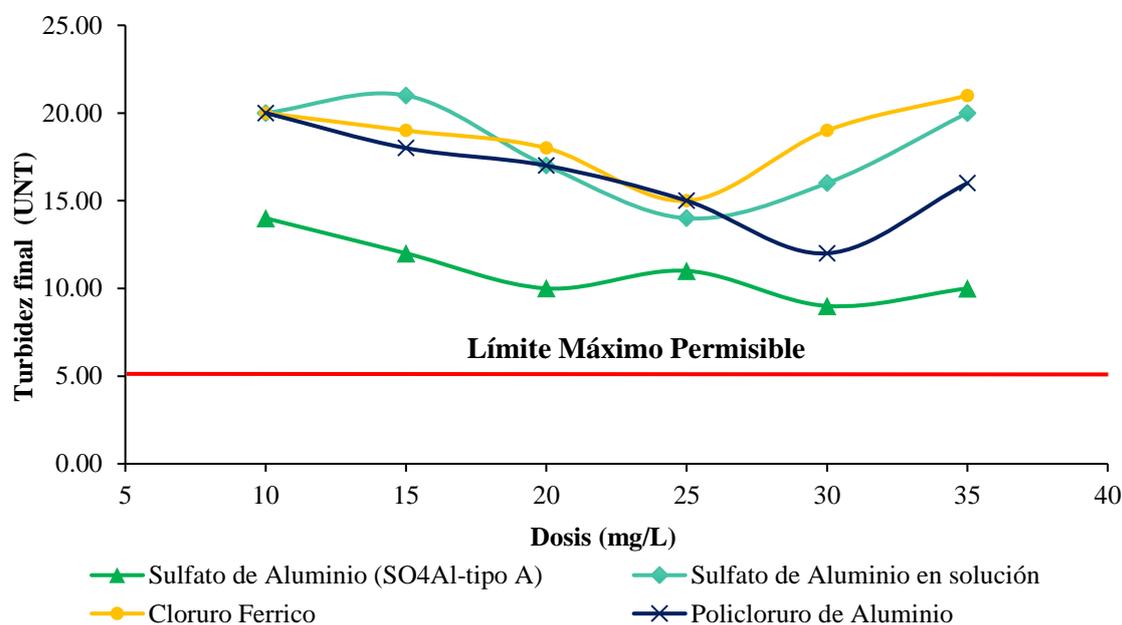
En la Tabla 46 se muestran las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante policloruro de aluminio (PAC)

a una concentración de 2.5%, en la Tabla se puede apreciar que el resultado óptimo lo presenta el vaso 5 el cual está trabajando con una dosis de 30 mg/L, obteniendo una turbidez final de 12 UNT y un color real de 20 UCV, dichos resultados finales no cumplen con los límites que establece el reglamento de calidad de agua para consumo humano respecto a color y turbidez. El nivel de pH del agua cruda es óptimo para permitir la floculación, sin embargo, existen otros parámetros determinantes como la gradiente de velocidad, tiempo de floculación y decantación.

Alvarado, Pérez, & Saba, (2014) declaran que el policloruro de aluminio permite atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en el agua sin desprender aluminio residual debido a sus fuertes enlaces de cadena inorgánica sin embargo, el sulfato de aluminio se dispersa de manera más rápida logrando así la formación inmediata de los flocs y presentando mayor eficiencia a comparación del policloruro de aluminio, por otro lado J. Pérez (2017) agrega que el policloruro de aluminio tiene más afinidad por las aguas alcalinas, en su investigación observo que al agregar mayor cantidad de cal en el agua cruda, la alcalinidad de ésta aumenta, aumentando también la interacción entre las partículas que reaccionan.

Figura 65.

Curva de coagulante óptimo y turbidez final

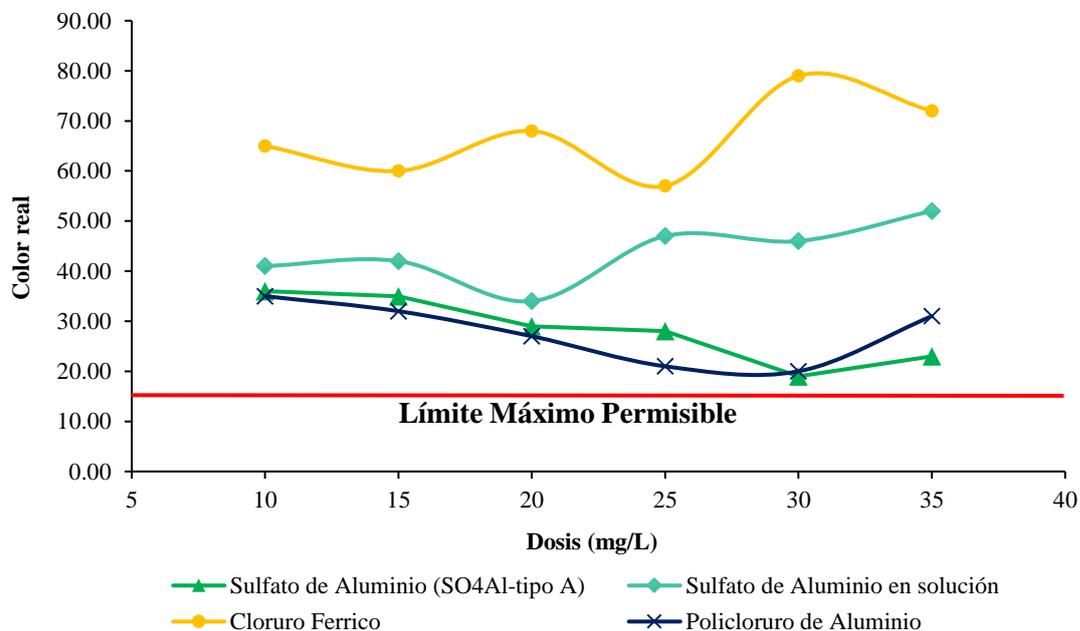


En la Figura 65 se muestra un gráfico de líneas suavizadas que representa la turbidez final frente a las dosis de coagulante, el resultado muestra el coagulante más efectivo para este tipo de agua es el sulfato de aluminio granulado tipo A con una dosis de 30 mg/L logrando reducir la turbidez a 9 UNT, esto básicamente por el rango de pH que presenta el agua cruda, con el registro de pH del agua cruda se observó que el rango está en un intervalo de 6.5 -8, la prueba de tratabilidad se realizó con una muestra de agua con 7.22 de pH, Rinne (2010) considera que el intervalo óptimo de pH para la acción coagulante del sulfato de aluminio granulado tipo A se encuentra en un rango de 6-8 y su porcentaje de remoción es mayor al 65%, sin embargo, 9 UNT no se encuentra dentro del reglamento de calidad de agua para consumo humano. De Vargas (2004) menciona que existen otros parámetros determinantes para la remoción, considera que para un tiempo de residencia dado, la eficiencia se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una

disminución de la eficiencia; por otro lado, considera existe un tiempo de residencia mínimo, la gradiente de velocidad asociado con este tiempo de residencia constituye un valor óptimo para una eficiencia dada, en el sentido de que cualquier otro valor, mayor o menor, dará como resultado una eficiencia menor. Con esta prueba concluimos que el problema no se encuentra en el insumo químico ni en la dosis del coagulante.

Figura 66.

Curva de coagulante óptimo y color real final.



En la Figura 66 se aprecia que el coagulante más efectivo para este tipo de agua es el sulfato de aluminio granulado tipo A con una dosis de 30 mg/L logrando reducir el color a 19 UCV, sin embargo, estos valores no son aceptables para el reglamento de calidad de agua para consumo. Rinne (2010) considera que el intervalo óptimo de pH para la acción coagulante del sulfato de aluminio granulado tipo A se encuentra en un rango de 6-8 y su porcentaje de remoción es mayor al 65%, sin embargo, 19 UCV no se encuentra dentro del reglamento de calidad de agua para consumo humano. De Vargas (2004) menciona que existen otros parámetros

determinantes para la remoción, considera que para un tiempo de residencia dado, la eficiencia se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una disminución de la eficiencia; por otro lado, considera que existe un tiempo de residencia mínimo, la gradiente de velocidad asociado con este tiempo de residencia constituye un valor óptimo para una eficiencia dada, en el sentido de que cualquier otro valor, mayor o menor, dará como resultado una eficiencia menor, con esta prueba concluimos que el problema no se encuentra en el insumo químico ni en la dosis del coagulante, por lo que se realizó más pruebas de laboratorio modificando los tiempos y gradientes de velocidad.

4.13.2. Pruebas de tratabilidad con una muestra de agua con turbidez alta

Tabla 47. *Características de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad*

Parámetro de la muestra de agua cruda		
Alcalinidad inicial	104	CaCO ₃ /L
pH inicial	7.58	Unidades de pH
Turbidez agua cruda	453	UNT
Temperatura del agua	21.3	°C
Color aparente	825	UCV
Color real	554	UCV
Conductividad	160.2	uS/cm

Las características de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad se presentan en la Tabla 47, corresponde a la segunda muestra con una turbidez alta de 453 UNT.

Tabla 48.

Resultados de la prueba de tratabilidad con sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5%

Insumo químico:	Sulfato de aluminio granulado tipo A					
Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	35	40	45	50	55	60
Ti (UNT)	26	24	22	12	7	23
Color Aparente	84	85	65	42	38	69
Color Real	39	47	36	35	26	36
pH	8.04	7.96	8.06	8.09	7.94	8.16
Conductividad (Us/cm)	160.9	162	164	164.9	165	166.2
Aluminio residual (mg/L)	0.025	0.023	0.021	0.008	0.009	0.006

En la Tabla 48 se muestran las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante al sulfato de aluminio granulado Tipo A a una concentración de 2.5%, con los resultados se puede apreciar que el resultado más óptimo lo presenta el vaso 5 con una dosis de 55 mg/L, con el cual se obtiene una turbidez fina de 7 UNT y un color real de 26 UCV; el reglamento de calidad de agua para consumo humano establece un valor de turbidez no mayor a 5 UNT y en color no mayor a 15 UCV, por lo tanto los resultados finales no son aceptables. Andía (2000) y Ramírez (2019) mencionan que el sulfato de aluminio presenta mayor efectividad en aguas con pH 6 – 8 ya que el aluminio es un metal trivalente, por lo tanto los iones positivos de las sales de aluminio neutralizan efectivamente los iones negativos que componen los sistemas coloidales logrando así mayor eficiencia en la reducción de turbidez en el agua, la muestra cruda presenta un nivel de pH dentro del rango óptimo, según (Cerón, 2016) el Al^{3+} puede también combinarse con los OH^- del agua para formar hidróxido de Al. Este hidróxido de aluminio es de carácter coloidal, ya que absorbe iones positivos en disolución para formar un sol cargado positivamente, dicho sol neutraliza la carga de los coloides negativos y ayuda a completar la aglomeración, sin embargo, existen otros

parámetros determinantes como son Gradientes de velocidad y tiempos de floculación óptimos, por otro lado las concentraciones de aluminio residual del agua cruda se encuentran por debajo de la unidad deseable establecida por el reglamento de calidad de agua para consumo humano.

Tabla 49.

Resultados de la prueba con sulfato de aluminio Tipo A en solución a una concentración de 2.5%

Insumo químico:	Sulfato de aluminio en solución tipo B					
Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	35	40	45	50	55	60
Ti (UNT)	25	23	19	17	22	35
Color Aparente	87	86	64	69	45	76
Color Real	42	46	36	41	32	42
pH	7.59	7.87	7.96	7.89	7.93	8.04
Conductividad (Us/cm)	161.2	163	165	164.3	165.1	165.7
Aluminio residual (mg/L)	0.020	0.023	0.001	0,002	0.000	0.008

Los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando diferentes dosis de sulfato de aluminio tipo A en solución una concentración de 2.5% se presenta en la Tabla 49 donde se puede apreciar que el resultado óptimo alcanza una turbidez de 17 UNT y color real 41 UCV aplicando una dosis de 50 mg/L. Con los resultados se puede evidenciar que con la aplicación el sulfato de aluminio en solución en este tipo de agua se obtiene un menor porcentaje de remoción a comparación de la prueba aplicando sulfato de aluminio granulado, los valores alcanzados no son aceptables por el reglamento de acalidad de agua para consumo humano, el cual establece un valor máximo de turbidez 5 UNT y color 15 UCV.

El sulfato de aluminio granulado Tipo A presenta un mayor porcentaje de óxidos de aluminio, superiores a 16.8, mientras que el sulfato de aluminio en solución presenta un porcentaje entre 7.4 - 7.7, por lo que la concentración de óxidos de

aluminio tendría mucha relación con la eficiencia del producto , por otro lado las concentraciones de aluminio residual del agua cruda se encuentran por debajo de la unidad deseable establecida por el reglamento de calidad de agua para consumo humano (Asociación Nacional de la Industria Química, 2015; MINSA, 2011).

Tabla 50.

Resultados de la prueba de tratabilidad con cloruro férrico al 2.5%

Insumo químico: Vasos	Cloruro férrico					
	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	35	40	45	50	55	60
Ti (UNT)	45	36	34	19	32	35
Color Aparente	99	98	84	48	68	76
Color Real	45	47	58	39	37	42
pH	7.56	7.45	7.43	7.47	7.37	7.35
Conductividad (Us/cm)	160.3	160.4	160.3	160.4	160.3	160.5
Hierro residual (mg/L)	0.022	0.023	0.021	0.025	0.022	0.017

En la Tabla 50 se aprecian las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante cloruro férrico con una concentración al 2.5%, donde se puede apreciar que el resultado más óptimo lo presenta el vaso 4 el cual está trabajando con una dosis de 50 mg/L, obteniendo una turbidez final de 19 UNT y un color real de 39 UCV, dicho coagulante representa un porcentaje de remoción menor a comparación del sulfato de aluminio granulado tipo A arrojando resultados finales que no cumplen los límites que establece el reglamento de calidad de agua para consumo humano respecto a color y turbidez, como ya se ha mencionado, el pH de la muestra fue de 7.58 el cual se encuentra fuera del rango de efectividad del cloruro férrico, además si bien el cloruro férrico es muy efectivo, el porcentaje de remoción es mayor cuando el pH está entre 3.5 - 7.0 u 8 - 9.5, pues genera especies de alta carga (iones trivalentes de mayor peso molecular) que son

vitales para la coagulación, lo más importante es que se requiere menor cantidad de insumo químico (Rinne, 2010; Tafur, 2017; Zerbato et al., 2009).

Tabla 51.

Resultados de la prueba de tratabilidad con Policloruro de aluminio PAC a una concentración de 2.5%

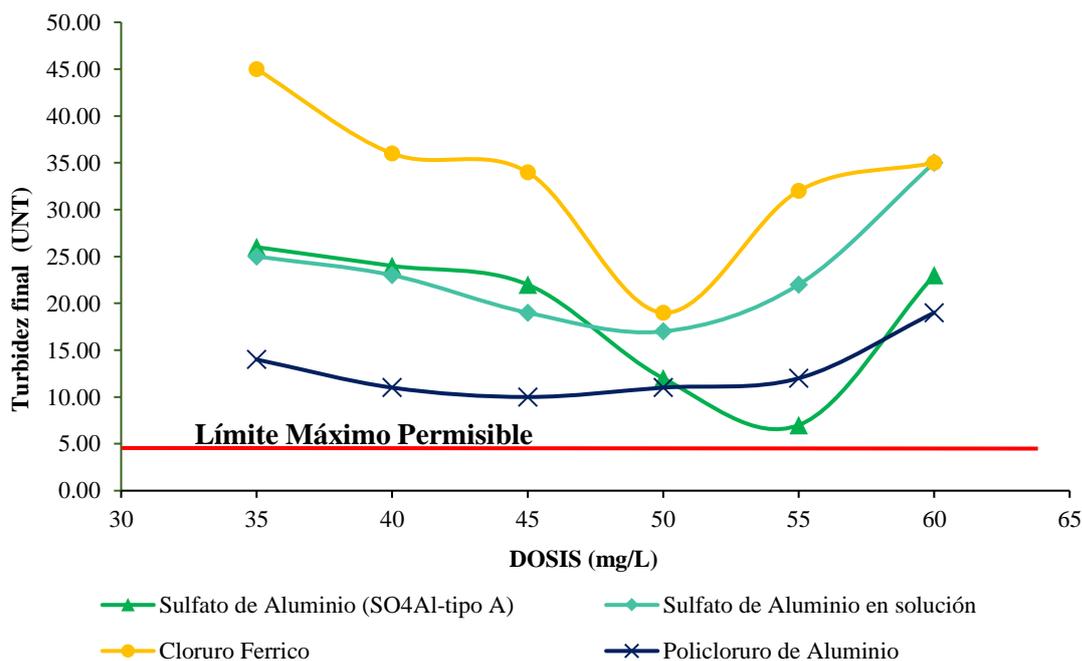
Insumo químico:	Policloruro de aluminio PAC						
	Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)		35	40	45	50	55	60
Ti (UNT)		14	11	10	11	12	19
Color Aparente		86	78	57	69	72	74
Color Real		43	46	39	39	42	41
pH		7.95	7.95	7.89	8.06	8.14	8.12
Conductividad (Us/cm)		161.5	163.7	164.6	165	166.2	166.7
Aluminio residual (mg/L)		0.170	0.020	0.023	0.001	0.002	0.008

En la Tabla 51 se muestran las dosis aplicadas en las pruebas de tratabilidad y los resultados obtenidos empleando como coagulante policloruro de aluminio (PAC) a una concentración de 2.5%, en la Tabla se puede apreciar que el resultado óptimo lo presenta el vaso 3, el cual está trabajando con una dosis de 45 mg/L, obteniendo una turbidez final de 10 UNT y un color real de 39 UCV, dichos resultados finales no cumplen con los límites que establece el reglamento de calidad de agua para consumo humano respecto a color y turbidez. El nivel de pH del agua cruda es óptimo para permitir la floculación, sin embargo, existen otros parámetros determinantes como la gradiente de velocidad, tiempo de floculación y decantación.

Según Alvarado et al. (2014) al el policloruro de aluminio permite atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en el agua sin desprender aluminio residual debido a sus fuertes enlaces de cadena inorgánica, sin embargo, el sulfato de aluminio se dispersa de manera más rápida logrando así la formación inmediata de los flocs y presentando mayor eficiencia a comparación del policloruro de aluminio, por otro lado J. Pérez (2017) considera que el policloruro de aluminio tiene más afinidad por las aguas alcalinas, en su investigación observo que al agregar mayor cantidad de cal en el agua cruda, la alcalinidad de ésta aumenta, aumentando también la interacción entre las partículas que reaccionan.

Figura 67.

Curva de coagulante óptimo y turbidez final



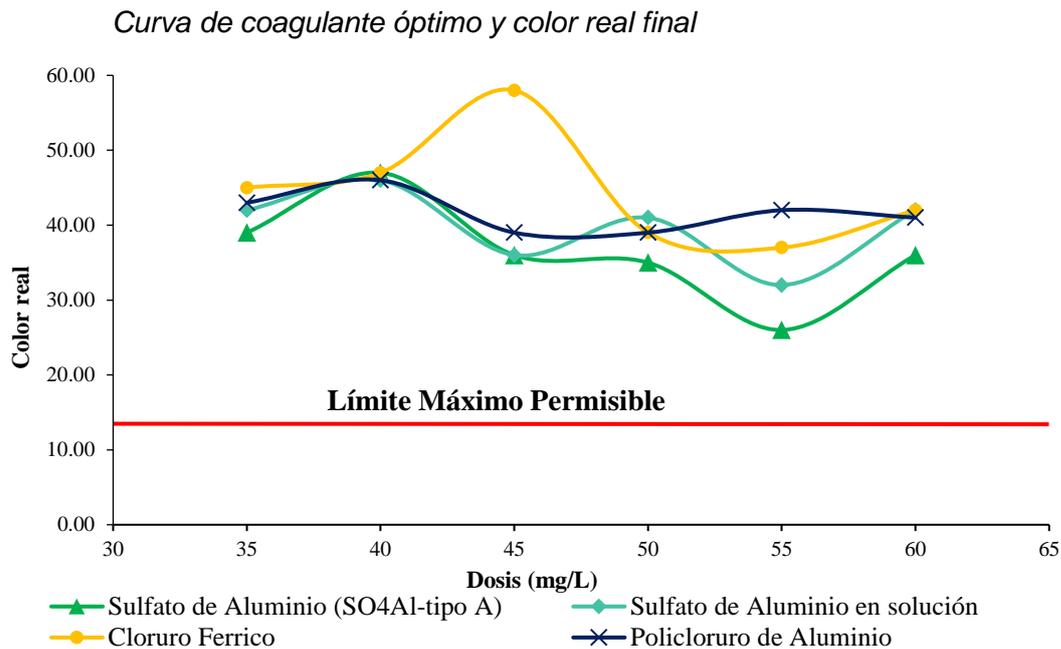
En la Figura 67 se observa que el coagulante más efectivo para este tipo de agua es el sulfato de aluminio granulado tipo A con una dosis de 55 mg/L logrando reducir la turbidez a 7 UNT, esto básicamente por el rango de pH que presenta el agua cruda, con el registro de pH del agua cruda se observó que el rango está en un

intervalo de 6.5 -8, la prueba de tratabilidad se realizó con una muestra de agua con 7.58 de pH, Rinne (2010) considera que el intervalo óptimo de pH para la acción coagulante del sulfato de aluminio granulado tipo A se encuentra en un rango de 6-8 y su porcentaje de remoción es mayor al 65%, sin embargo, 7 UNT no se encuentra dentro del reglamento de calidad de agua para consumo humano.

Menciona que las dosis aplicables son relativamente altas por lo que en la siguiente prueba se confirma que es así ya que aplicamos dosis de 30 a 65 y en todos se cumplieron las curvas que se pretende alcanzar con los resultados

. De Vargas (2004) menciona que existen otros parámetros determinantes para la remoción, considera que para un tiempo de residencia dado, la eficiencia se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una disminución de la eficiencia; por otro lado, considera existe un tiempo de residencia mínimo, la gradiente de velocidad asociado con este tiempo de residencia constituye un valor óptimo para una eficiencia dada, en el sentido de que cualquier otro valor, mayor o menor, dará como resultado una eficiencia menor. Con esta prueba concluimos que el problema no se encuentra en el insumo químico ni en la dosis del coagulante.

Figura 68.



En la Figura 68 podemos ver que el coagulante más efectivo para este tipo de agua es el sulfato de aluminio granulado tipo A con una dosis de 55 mg/L logrando reducir el color a 26 UCV, sin embargo, estos valores no son aceptables para el reglamento de calidad de agua para consumo, los valores de color están relacionados con la turbidez, por tanto, la efectividad del sulfato de aluminio granulado básicamente se dio por el intervalo óptimo de pH, sin embargo no alcanzamos los valores requeridos por la norma por lo que con esta prueba concluimos que el problema no se encuentra en el insumo químico ni en la dosis del coagulante.

4.14. Resultados de tratabilidad para determinación de pH óptimo de floculación

Para conocer la influencia del pH en el proceso de floculación se realizaron pruebas a diferentes niveles de pH. En la Tabla 52 se muestran los gradientes y tiempos de floculación con los que opera la planta, en la Tabla 53 se observa la

caracterización de la muestra de agua y en la Tabla 54 la concentración y dosis del coagulante empleado en la prueba de tratabilidad.

Tabla 52.

Gradientes y tiempos de floculación real de la PTAP Villa Rica

Procesos	Gradiente de velocidad S ¹	RPM	Tiempo
Mezcla rápida		300	00:00:05
	48	38	00:06:30
Mezcla lenta	26	24	00:09:30
	10	12	00:07:00
Sedimentación	0	0	00:10:00

Tabla 53.

Caracterización de la muestra de agua para las pruebas de tratabilidad

Características del agua cruda		
Alcalinidad inicial	96	CaCO ₃ /l
pH inicial	7.22	Unidades de pH
Turbidez agua cruda	23	UNT
Temperatura del agua	20.08	°C
Color aparente	195	UCV
Color real	153	UCV
Conductividad	110	Us/cm

Tabla 54.

Insumo químico, concentración y dosis del coagulante

Insumos químicos	Concentración	Dosis (mg/L)
Coagulante (SO ₄ Al-tipo A)	2.5 %	30

Tabla 55.

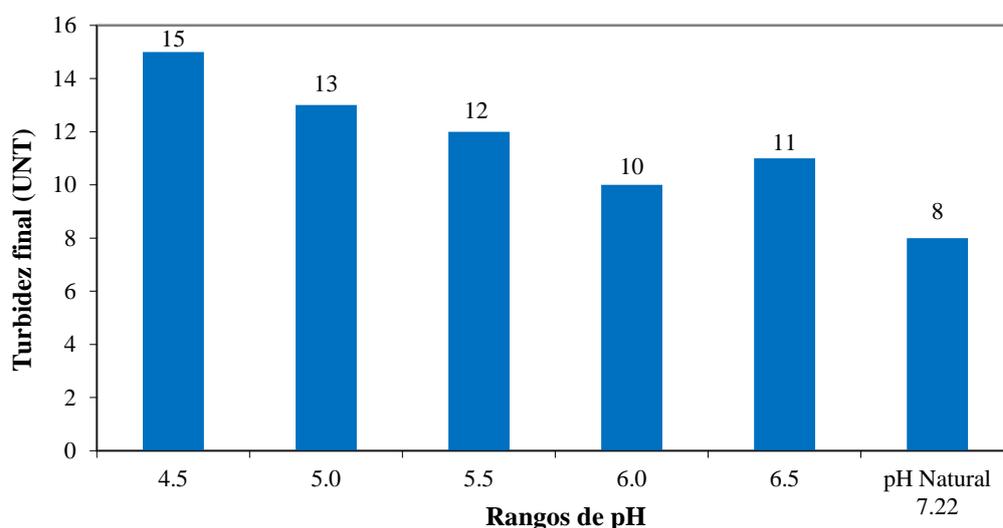
Resultados de la prueba de tratabilidad a diferentes niveles de pH.

Vasos	1	2	3	4	5	6
pH	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	pH Natural 7.22

Volumen del coagulante (mL)	6 mL					
Ti	15	13	12	10	11	8
Porcentaje de remoción	35	43	48	57	52	65
Color Aparente	55	51	48	41	45	39
Color Real	27	25	24	21	24	20

Figura 69.

Resultados de Turbidez final a distintos niveles de pH



En la Figura 69 se observa que el resultado óptimo empleando como coagulante sulfato de aluminio granulado Tipo A a una concentración de 2.5% se logra con el pH natural del agua, alcanzando una turbidez de 8 UNT y color de 20 UCV. Cerón (2016) considera que el rango de pH está en función del tipo de coagulante a emplear y la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua a tratar, existiendo un rango óptimo específico en el que la coagulación tiene lugar con mayor rapidez, Rinne (2010) considera que el intervalo óptimo de pH óptimo para la acción coagulante del sulfato de aluminio granulado tipo A se encuentra en un rango de 6-8, la muestra de agua con pH natural fue de 7.22 de pH dentro del rango óptimo

Según J. Pérez (2017) el pH es una de los factores de importancia en la tratabilidad del agua potable dentro del proceso de coagulación, afectando la solubilidad de los precipitados que se van formando a causa de la adición del agente

coagulante y afectando también el tiempo que se requiere para que se formen los flóculos, también considera que los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el aluminio y generar problemas al usuario del agua. Cuanto menos sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del flóculo a cambios de pH. El agua cruda presenta un pH óptimo de 7.22, dentro del rango, por lo que los cambios de pH no generan efectos significativos en la remoción.

4.15. Resultados de tratabilidad con polímero catiónico como ayudante de coagulación y floculación

4.15.1. Resultados de la prueba de tratabilidad aplicando polímero catiónico como ayudante de coagulación

Tabla 56.

Características de la muestra cruda del agua

Característica de la muestra de agua cruda		
Alcalinidad inicial	104	CaCO ₃ /L
pH inicial	7.58	
Turbidez agua cruda	453	UNT
Temperatura del agua	21.3	°C
Color aparente	825	UCV
Color real	554	UCV
Conductividad	160.2	uS/cm

Tabla 57.

Insumos químicos, dosis y concentración aplicada en la prueba de tratabilidad para hallar dosis óptima de polímero catiónico

Insumos químicos	Dosis	Concentración
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	30 mg/L	2.5 %
Polímero catiónico	Variable	0.023%

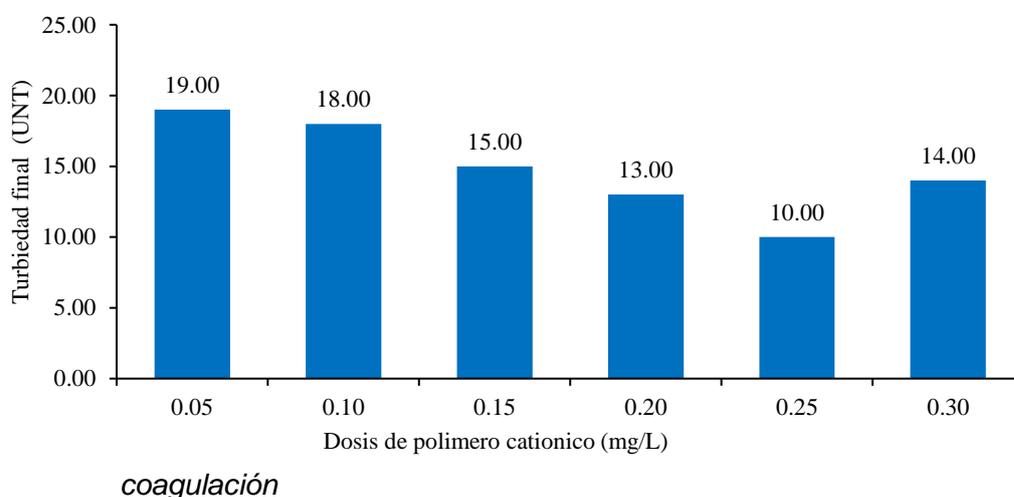
Tabla 58.

Resultados de la dosis optima de polímero catiónico como ayudante de coagulación

VASOS	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	30	30	30	30	30	30
Volumen del coagulante reac (mL)	2.4 mL					
Dosis Polímero	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Vol. del polímero	0.43	0.87	1.30	1.74	2.17	2.61
Turbidez final	19	18	15	13	10	14
Porcentaje de remoción	96	96	97	97	98	97
Color Real	34	30	28	37	25	32

Figura 70.

Resultados de la dosis óptima del polímero catiónico como ayudante de



En la Tabla 58 y en la Figura 70 se muestran los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando 30 mg/ L de sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5 % y como ayudante de coagulación polímero catiónico con dosis variables (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 y 0.30 mg/L) a una concentración de 0.023%,

el resultado óptimo se alcanza con una dosis de 0.25 mg/L de polímero catiónico alcanzado remover la turbidez a 10 UNT y color real de 25 UCV.

Tabla 59.

Insumos químicos, dosis y concentración para determinar la dosis de coagulante con polímero catiónico

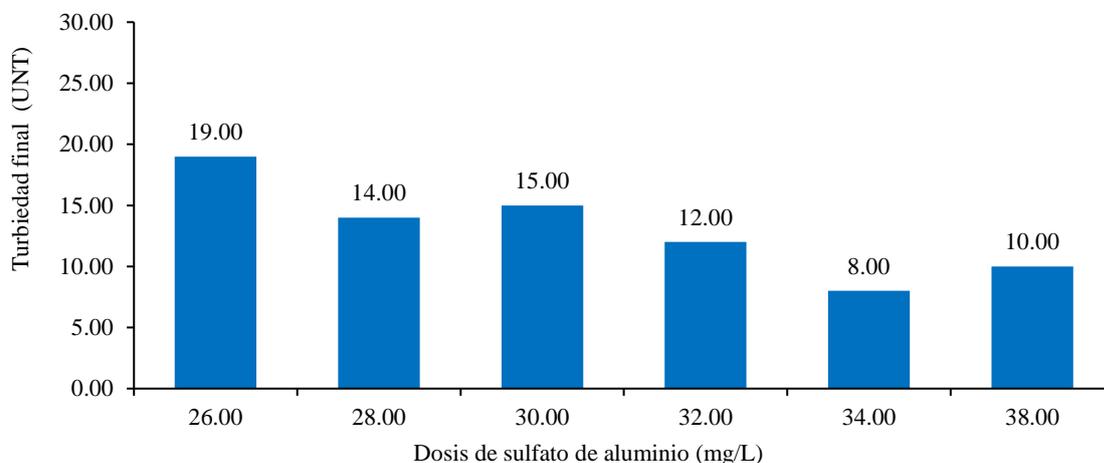
Insumos químicos	Dosis	Concentración
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	Variable	2.5 %
Polímero catiónico	0.25 mg/L	0.023%

Tabla 60.

Resultados de la dosis optima de sulfato de aluminio granulado tipo A como ayudate de coagulación

Dosis optima de coagulante (sulfato de aluminio tipo a) con polímero/ayudante de coagulación						
Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	26	28	30	32	34	38
Vol. del coagulante real (mL)	2.08 mL	2.24 mL	2.4 mL	2.56 mL	2.72 mL	3.04 mL
Dosis Polímero	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Vol. del polímero	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
Ti	19.00	14.00	15.00	12.00	8.00	10.00
Porcentaje de remoción	96	97	97	97	99	98
Color Real	20	18	19	21	15	18

Figura 71. Resultados de la dosis optima de sulfato de aluminio tipo A aplicado con polímero catiónico como ayudante de coagulación



En la Tabla 60 y en la Figura 71 se muestran los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando la dosis optima de polímero catiónico determinado en la prueba anterior 0.25 mg/ L a una concentración de 0.023% y dosis variables de sulfato de aluminio granulado tipo A (26, 28, 30, 32, 34 y 38 mg/L) a una concentración de 2.5 %, el resultado óptimo se alcanza con una dosis de 34 mg/L de sulfato de aluminio granulado tipo A alcanzado remover la turbidez a 8 UNT y color real a 15 UCV. J. Pérez (2017) menciona a los polímeros más eficientes que el sulfato de aluminio por sus ventajas de menor producción de lodos y menor dependencia de la temperatura y el pH. Aunque, su eficiencia se ve afectada por parámetros como la composición del agua cruda y las condiciones de operación específicas como las gradientes de velocidad o tiempos de floculación,

Andía (2000) menciona que la floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso, por otro lado, bajo condiciones hidráulicas optimas según Alvarado et al.

(2014) el polímero catiónico permite atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en el agua sin desprender aluminio residual debido a sus fuertes enlaces de cadena inorgánica, Andía (2000) considera que el polímero como ayudante de coagulación es aplicado cuando la aglomeración de varios coloides no sean lo que suficientemente grande como para sedimentar con la rapidez deseada, por lo que el empleo de polímero es necesario para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados.

4.15.2. Resultados de la prueba de tratabilidad aplicando polímero catiónico como ayudante de floculación

Tabla 61.

Insumos químicos, dosis y concentración para determinar dosis de polímero catiónico

Insumos químicos	Dosis	Concentración
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	55 mg/L	2.5 %
Polímero catiónico	Variable	0.023%

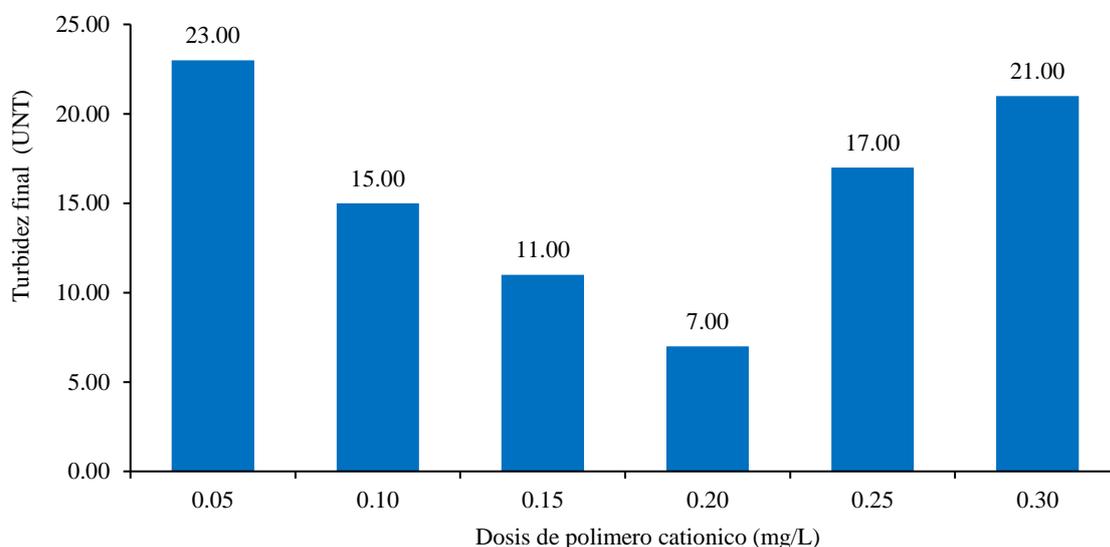
Tabla 62.

Resultado de la dosis optima de polímero catiónico como ayudante de floculación

VASOS	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	55	55	55	55	55	55
Volumen del coagulante real (mL)	4.4 mL					
Dosis Polímero	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Vol. del polímero	0.43	0.87	1.30	1.74	2.17	2.61
Turbidez final	23.00	15.00	11.00	7.00	17.00	21.00
Porcentaje de remoción	95	97	98	98	96	95
Color Real	28.00	26.00	16.00	12.00	27.00	31.00

Figura 72.

Resultado de la dosis optima del polímero catiónico como ayudante de floculación



En la Tabla 62 y en la Figura 72 se muestran los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando 55 mg/ L de sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5 % y como ayudante de floculación polímero catiónico con dosis variables (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 y 0.30 mg/L) a una concentración de 0.023%, el resultado óptimo se alcanza con una dosis de 0.20 mg/L de polímero catiónico alcanzado remover la turbidez a 7 UNT y color real de 12 UCV.

Tabla 63.

Insumos químicos, dosis y concentración para determinar dosis del coagulante con polímero catiónico.

Insumos químicos	Dosis	Concentración
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	Variable	2.5 %
Polímero catiónico	0.20 mg/L	0.023%

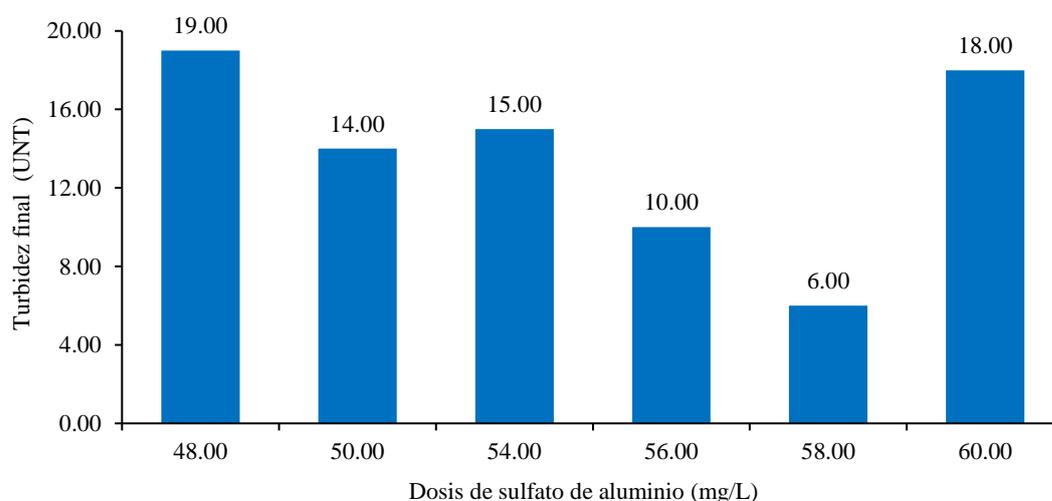
Tabla 64.

Resultados de la dosis optima de coagulante (sulfato de aluminio tipo A) con polímero catiónico

VASOS	1	2	3	4	5	6
Dosis del coagulante (mg/L)	48	50	54	56	58	60
Volumen del coagulante real (mL)	3.84 mL	4 mL	4.3 mL	4.48 mL	4.64 mL	4.8 mL
Dosis Polímero	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Vol. del polímero	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74
Turbidez final	19	14	15	10	6	16
Porcentaje de remoción	96	97	97	98	99	96
Color Real	27	23	22	19	10	28

Figura 73.

Dosis óptima de sulfato de aluminio tipo A



En la Tabla 64 y en la Figura 73 se muestran los resultados de la prueba de tratabilidad aplicando la dosis optima de polímero catiónico determinado en la prueba anterior (0.20 mg/ L a una concentración de 0.023%) y dosis variables de sulfato de aluminio granulado tipo A (26, 28, 30, 32, 34 y 38 mg/L) a una concentración de 2.5 %, el resultado óptimo se alcanza con una dosis de 58 mg/L de sulfato de aluminio granulado tipo A alcanzado remover la turbidez a 6 UNT y color real a 10 UCV.

Lorenzo (2006) menciona que si con el uso del coagulante no se consigue siempre un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación, es recomendable el uso de floculantes como ayudantes de la floculación, el polímero catiónico favorece la aglomeración de los flóculos a través de puentes incrementando su volumen y peso, sin embargo, para favorecer el engrosamiento del flóculo será necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto. En los estudios de floculación con polielectrolitos se ha encontrado que la distribución del diámetro de las partículas es un parámetro de influencia en la dosis óptima del polímero requerido para flocular una suspensión. Se puede afirmar que para cada polielectrolito existe una dosis óptima, cualquiera que sea el uso y que si se sobrepasa esta dosis puede producirse una reestabilización de coloides y un desmejoramiento de la calidad del agua tratada. Las dosis de polímeros floculantes para clarificación de aguas es normalmente muy bajo, en el rango de 0.05-2.0 ppm.

4.16. Resultados de las pruebas de tratabilidad para determinar tiempos y gradientes

4.16.1. Resultados de las pruebas de tratabilidad para la muestra con turbidez baja

De acuerdo a lo antes mencionado el coagulante que mejor funcionó fue el Sulfato de Aluminio con una dosis óptima de 30 mg/L, la concentración que empleó va en función a la facilidad del manejo del insumo químico por parte del operador, ya que el tanque para la preparación de la solución tiene una capacidad de 1 m³ y los sacos que contienen dicho insumo químico tienen un peso de 25 Kg, un saco por m³ permite obtener una solución al 2.5 %.

Tabla 65. *Insumo químico, concentración y dosis aplicada en la prueba de tratabilidad*

Insumo químico	Concentración	Dosis
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	2.5%	30 mg/L

Para la prueba de laboratorio, en la Tabla 66 se muestran las características de la muestra de agua con turbidez baja.

Tabla 66.

Características del agua cruda con turbidez baja

Características del agua cruda		
Alcalinidad inicial	96	CaCO ₃ /l
pH inicial	7.22	Unidades de pH
Turbidez agua cruda	23	UNT
Temperatura del agua	20.08	°C
Color aparente	195	UCV
Color real	153	UCV
Conductividad	110	Us/cm

Villegas y Letterman citados por De Vargas (2009) mencionan que es de fundamental importancia realizar pruebas para hallar el gradiente y tiempos óptimos ya que estos son los parámetros operacionales que más influyen en el tratamiento, su variación puede causar el incremento o disminución de la eficiencia de remoción de color y turbidez.

Tabla 67.

Resultados de la prueba con gradiente de 20 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	20	20	10	17	37
	30	20	20	15	16	32
	30	20	20	20	11	25
	30	20	20	25	12	27

30	20	20	30	9	24
30	20	20	35	7	21

En la Tabla 67 se muestran los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 20 S⁻¹. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 35 min obteniendo resultados de turbidez final 7 y color real 21; De Vargas (2004a) resalta la importancia del tiempo de mezcla sobre la velocidad de aglomeración de partículas, asimismo en los resultados mostrados en su investigación obtuvo un tiempo de floculación óptimo de 35 minutos; por otro lado Domínguez (2010) usando una muestra de agua con turbidez de 21 UNT obtuvo el mayor porcentaje de remoción con un tiempo de floculación de 40 minutos por lo que los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con otros estudios. De acuerdo con el reglamento nacional de calidad de agua para consumo humano los resultados no son aceptables porque sobrepasan los límites máximos permisibles.

Tabla 68.

Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 30 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color Real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	30	28	10	15	34
	30	30	28	15	13	31
	30	30	28	20	11	23
	30	30	28	25	10	19
	30	30	28	30	8	17
	30	30	28	35	17	39

En la Tabla 68 se muestran los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 30 S⁻¹. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 30 min obteniendo resultados de turbidez final 8 y color real 17; como ya ha sido mencionado, diversos estudios realizados establecen que se logra mayor eficiencia

de remoción empleando tiempos entre 20 y 40 min. Asimismo algunos autores hallaron mejores resultados de remoción con 30 S-1 y 30 (Domínguez, 2010; Ordoñez & Paz, 2016; J. Pérez, 2017; Tafur, 2017).

Tabla 69.

Resultados de la prueba con gradiente de 40 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color Real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	40	32	10	12	27
	30	40	32	15	9	19
	30	40	32	20	8	15
	30	40	32	25	5	11
	30	40	32	30	2	6
	30	40	32	35	9	13

En la Tabla 69 se muestran los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 40 S⁻¹. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 30 min obteniendo resultados de turbidez final 2 y color real 6; como ya ha sido mencionado, la gran diversidad de estudios realizados establece que se logra mayor eficiencia de remoción empleando tiempos entre 20 y 40 min estudios ante el tiempo de mezcla actúa sobre la velocidad de aglomeración de partículas. Domínguez (2010) en su estudio halló muy buenos resultados de remoción con tiempo de 30 min Se ha derivado una relación matemática que describe la cinética de la floculación. Tiene en cuenta el tiempo y la intensidad de floculación, la dosis de coagulante y el volumen y contenido de sólidos del flóculo. Esta relación indica que el atrapamiento de materia suspendida por el flóculo está influenciado por el volumen del flóculo producido más que por el tamaño o la apariencia de las partículas del flóculo (Hudson, 1965).

Tabla 70.*Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 50 S⁻¹.*

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	50	39	10	19	45
	30	50	39	15	17	37
	30	50	39	20	16	39
	30	50	39	25	15	34
	30	50	39	30	18	41
	30	50	39	35	19	46

En la Tabla 70 se presentan los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 50 S⁻¹. Los resultados alcanzan una turbidez de 15 UNT y 34 UCV de color con un tiempo de 25 minutos, sin embargo no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos; y los niveles de turbidez y color son más altos. De acuerdo a los estudios realizados por diversos autores, no se han obtenido buenos resultados con un gradiente de 50 S⁻¹. (Clavijo, 2013; Domínguez, 2010; Restrepo, 2009)

Tabla 71.*Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 60 S⁻¹.*

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	60	43	10	14	32
	30	60	43	15	17	47
	30	60	43	20	18	45
	30	60	43	25	19	48
	30	60	43	30	18	46
	30	60	43	35	20	49

En la Tabla 71 se visualizan los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 60 S⁻¹ y 43 RPM. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 10 min obteniendo resultados de turbidez final 14 y color real 32, de esto se puede deducir que a medida que aumenta el gradiente de velocidad, la velocidad de aglomeración de partículas es mayor por lo tanto el tiempo óptimo de floculación es menor, una vez superado ese tiempo, la calidad de agua disminuye porque la fuerza ejercida sobre el floc hace que este se erosione o se fracture. Los estudios realizados en plantas de tratamiento de agua potable hallaron resultados similares usando un gradiente de 60 S⁻¹ (Clavijo, 2013; De Vargas, 2004a; Diaz, 2017b; Domínguez, 2010).

A continuación, se muestra en la Tabla 72 y 73 un acumulando de los resultados de las Tablas anteriores, los resultados obtenidos a gradientes de 20, 30 y 40 y tiempos de 20, 25 y 30 minutos fueron mejores, por lo tanto, se tomaron como referencia para el diseño experimental. En las Figuras 74 y 75 se muestra la curva que representa el comportamiento de la turbidez final a diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad, nuevamente se comprobó que los mejores tiempos corresponden a 20, 25 y 30 minutos y los mejores gradientes son los de 20, 30 y 40 S⁻¹ debido a la configuración de la curva.

Tabla 72.

Resultados de turbidez final a diferentes tiempos y gradientes.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Gradiente (S⁻¹)</i>				
	20	30	40	50	60
10	17	15	12	19	14
15	16	13	9	14	19
20	11	11	8	16	18
25	12	10	5	15	19
30	9	8	2	18	18
35	7	17	9	19	18

Tabla 73.*Resultados de color final a diferentes tiempos y gradientes.*

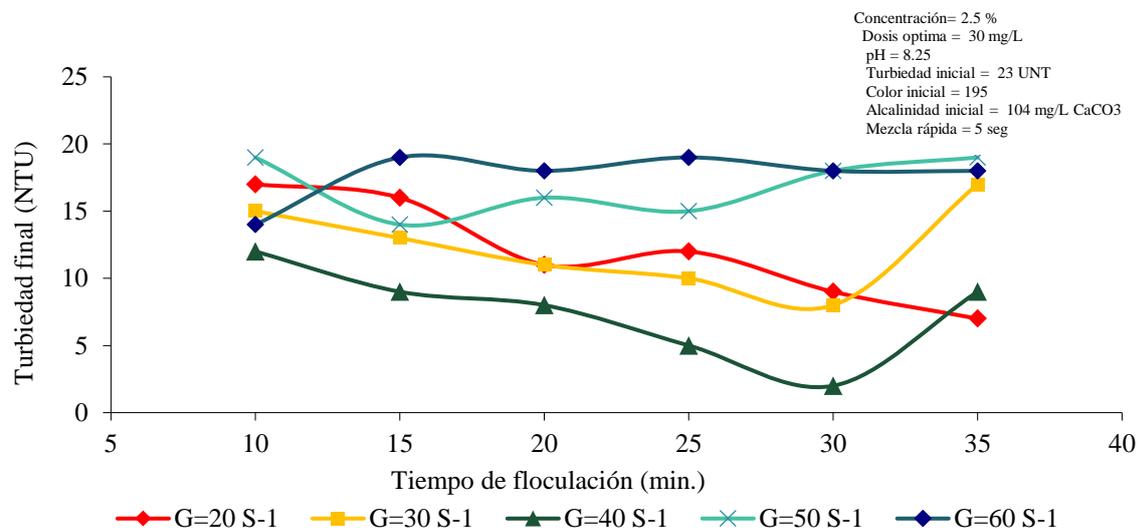
<i>Tiempo (min)</i>	<i>Gradiente (S⁻¹)</i>				
	20	30	40	50	60
10	37	34	27	45	32
15	32	31	19	37	47
20	25	23	15	39	45
25	27	19	11	34	48
30	24	17	6	41	46
35	21	39	13	46	49

En la Tabla 72 y 73 se presentan los resultados finales de turbidez y color final a diferentes tiempos y gradientes de velocidad, se observa que niveles más bajos de color y turbidez se hallaron con un gradiente de velocidad de 40 S⁻¹ y tiempo de floculación de 30 minutos que coinciden con los resultados del CEPIS y otros autores quienes sostienen que se logran resultados óptimos usando gradientes de velocidad entre 20 y 75 S⁻¹ y tiempos de floculación entre 20 y 40 min. Adicionalmente en las Figuras 74 y 75 se presenta un gráfico de líneas, en el eje Y se muestra la turbidez final y en el eje X los tiempos de floculación; cada línea con su respectivo marcador representa la variación de la turbidez a diferentes gradientes de velocidad (De Vargas, 2004^a, Arboleda, 2000). A medida que la gradiente de velocidad aumenta, también lo hace la eficiencia de remoción, esto ocurre hasta llegar a un gradiente óptimo de 40 S⁻¹, para este gradiente el tiempo de mezcla óptimo es de 30 minutos en el que se obtuvo una turbidez de 2 y color de 6, en los diferentes casos posterior al tiempo y gradiente óptimos, los valores de color turbidez final volvieron a elevarse, respecto a esto Argaman y Kaufman citados por De Vargas (2009) demostraron que, para cada tiempo de floculación existe una gradiente de velocidad que optimiza el proceso, debajo de este valor no se consigue la misma eficiencia y al ser superado se rompe el floc formado, esto explica la el patrón de las líneas. Analizando la cinética del

proceso de floculación, Agaman & Kaufman hallaron que mientras el gradiente es mayor, también se incrementa la velocidad de aglomeración de las partículas y que el tamaño máximo estable de un floc depende en gran medida del gradiente de velocidad; a medida que el floc crece también lo hacen las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico producida por el gradiente de velocidad, una vez que se sobrepasa el máximo tamaño estable de un floc, esa fuerza es tan intensa q logra desfragmentarlo en partículas menores que no sedimentan fácilmente y causan colmatación de los filtros disminuyendo así la calidad del producto, la bibliografía consultada agrega que la aglomeración y ruptura del floc están estrechamente ligados al gradiente de velocidad (Andía, 2000; De Vargas, 2004a, 2006, 2009; Restrepo, 2009).

Figura 74.

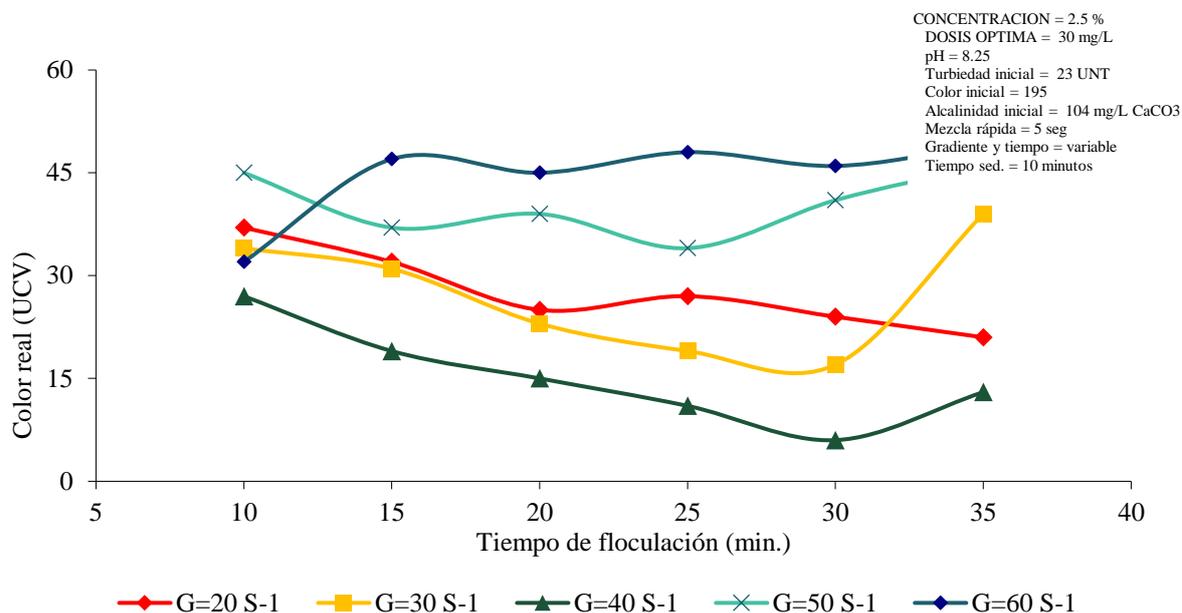
Curva turbidez final vs tiempo de floculación



En la Figura 74 se muestran los resultados finales de turbidez a diferentes tiempos y gradientes de velocidad, se observa que el resultado óptimo lo alcanzamos a una gradiente de 40 S^{-1} con un tiempo de 30 minutos.

Figura 75.

Curva color real vs gradiente de floculación



En la Figura 75 se muestran los resultados color real a diferentes tiempos y gradientes de velocidad, se observa que el resultado óptimo lo alcanzamos a una gradiente de 40 S^{-1} con un tiempo de 30 minutos.

4.16.2. Resultados de las pruebas de tratabilidad para la muestra con turbidez alta

El coagulante químico aplicado (Sulfato de Aluminio granulado Tipo A) fue determinado con las pruebas anteriores, también se determinó la dosis óptima para este tipo de agua siendo 55 mg/L , la concentración va en función a la facilidad del manejo del insumo químico por parte del operador, ya que el tanque para la preparación de la solución tiene una capacidad de 1 m^3 y los sacos que contienen dicho insumo químico tienen un peso de 25 Kg , un saco por m^3 permite obtener una solución al 2.5% .

Tabla 74.

Insumo químico, concentración y dosis aplicada

Insumos químicos	Concentración	Dosis
Sulfato de Aluminio granulado tipo A	2.5%	55 mg/L

En la Tabla 74 se muestra el insumo químico aplicado así como su dosis y concentración, en la tabla 75 se presentan las características de la muestra de agua empleada para la prueba de laboratorio, como característica principal, el agua posee niveles elevados de turbidez (452 UNT) y color (825 UCV).

Tabla 75.

Características del agua cruda con turbidez alta

Características de la muestra de agua cruda		
Alcalinidad inicial	104	CaCO ₃ /L
pH inicial	7.58	
Turbidez agua cruda	453	UNT
Temperatura del agua	21.3	°C
Color aparente	825	UCV
Color real	554	UCV
Conductividad	160.2	uS/cm

Como ya se ha mencionado las pruebas para hallar el gradiente y tiempo óptimos es muy importante porque de estos factores depende la eficiencia de remoción de color y turbidez. En esta prueba se pretende determinar gradiente de velocidad y tiempo óptimo de floculación por lo que en la siguiente el proceso de mezcla lenta presenta gradientes y tiempos variables.

Tabla 76.

Resultado de la prueba de tratabilidad con gradiente de 20 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	20	20	10	32	67
	30	20	20	15	29	59
	30	20	20	20	23	56
	30	20	20	25	19	35
	30	20	20	30	17	32
	30	20	20	35	27	45

En la Tabla 76 se presentan los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 20 S⁻¹. Los resultados muestran que el mejor tiempo de floculación es de 30 min, esto concuerda con lo señalado por diversos autores en que se logran mejores resultados con tiempos entre 20 y 60 min; sin embargo, la turbidez final fue 17 UNT y el color real 32 UCV, estos valores sobrepasan los establecidos por el reglamento nacional de calidad de agua para consumo humano. MRWA (2009) sostiene que la causa es que no se ha hallado el gradiente óptimo, es evidente que a 20 S⁻¹ no se favorece la formación adecuada de los flocs (De Vargas, 2004a; Tripathy & Ranjan, 2006).

Tabla 77.

Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 30 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color real
	Mg/L	S-1	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	30	28	10	21	34
	30	30	28	15	17	28
	30	30	28	20	17	29
	30	30	28	25	12	26
	30	30	28	30	13	25
	30	30	28	35	19	36

En la Tabla 77 se muestran los valores de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 30 S⁻¹ y los RPM correspondientes. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 25 min obteniendo resultados de turbidez final 12 y color real 26; como ya ha sido dicho, se logra mayor eficiencia de remoción empleando tiempos entre 20 y 40 min, sin embargo los resultados no cumplen con el reglamento de calidad de agua y evidencian que no se ha realizado una coagulación

eficiente debido a que la gradiente de velocidad no ha logrado la aglomeración de partículas y formación de flocs suficientemente estables (MRWA, 2009; Ordoñez & Paz, 2016; TWT, 2010) .

Tabla 78.

Resultado de la prueba de tratabilidad con gradiente de 40 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente		Tiempo de floculación	Turbidez final	Color real
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	40	32	10	15	23
	30	40	32	15	12	21
	30	40	32	20	9	18
	30	40	32	25	5	13
	30	40	32	30	3	7
	30	40	32	35	6	12

En la Tabla 78 se presentan los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 40 S-1 y los RPM equivalentes. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención fue de 30 min obteniendo los resultados de turbidez final 3 y color real 7 pues se ha logrado hallar la gradiente de velocidad y tiempo de floculación óptimo, diversos estudios han logrado resultados muy similares (Clavijo, 2013; De Vargas, 2004a; Diaz, 2017b; Tafur, 2017). Por otro lado, Hudson (1965) a través de ecuaciones matemáticas describió que la gradiente de velocidad está estrechamente ligada al fenómeno de formación y también al rompimiento de los flocs demostrándose de esta manera la importancia de determinar el gradiente óptimo de floculación.

Tabla 79.

Prueba con gradiente de 50 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente	Tiempo de floculació n	Turbidez final	Color real
----	-------	-----------	---------------------------------	----------------	------------

	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natura l	30	50	38	10	37	52
	30	50	38	15	31	53
	30	50	38	20	28	38
	30	50	38	25	19	27
	30	50	38	30	21	29
	30	50	38	35	23	32

En la Tabla 79 están presentados los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 50 S⁻¹. Los resultados muestran que se logra los menores valores de turbidez a 25 min, sin embargo no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos a diferentes tiempos; además los resultados obtenidos difieren mucho de los logrados con un gradiente de velocidad de 40 S⁻¹. Cabe señalar también que los estudios realizados por diversos autores, no se han obtenido buenos resultados con un gradiente de 50 S⁻¹. (Clavijo, 2013; Domínguez, 2010; Minnessota rural water association, 2009; Restrepo, 2009a).

Tabla 80.

Resultados de la prueba de tratabilidad con gradiente de 60 S⁻¹.

pH	Dosis	Gradiente	Tiempo de floculación	Turbidez final	Color Real	
	mg/L	S ⁻¹	(RPM)	(min)	UNT	UCV
Natural	30	60	43	10	38	54
	30	60	43	15	39	63
	30	60	43	20	31	52
	30	60	43	25	34	58
	30	60	43	30	42	62
	30	60	43	35	47	67

En la Tabla 80 se visualizan los resultados de color y turbidez final a diferentes tiempos de floculación aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio, el gradiente de velocidad de 60 S⁻¹ y 43 RPM. Los resultados muestran que el mejor tiempo de retención es de 20 min para turbidez, sin embargo, nuevamente no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos con diferentes tiempos de floculación. Por

otro lado, a medida que aumenta el gradiente de velocidad la aglomeración es más acelerada y el tiempo óptimo de floculación es menor, lo cual se evidencia en los resultados. Como ya se ha mencionado, una vez superado el tiempo óptimo de floculación y la gradiente de velocidad, la calidad de agua disminuye porque la fuerza ejercida sobre el floc hace que este se erosione o se fracture, esto queda demostrado en las Figuras 72 y 73 (Clavijo, 2013; Diaz, 2017a; The water treatments, 2010; Tripathy & Ranjan, 2006).

Tabla 81.

Resultados de turbidez final a diferentes tiempos y gradientes.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Gradiente (S⁻¹)</i>				
	20	30	40	50	60
10	32	21	15	37	38
15	29	17	12	31	39
20	23	17	9	28	31
25	19	12	5	19	34
30	17	13	3	21	42
35	27	19	6	23	47

Tabla 82.

Resultados de color final a diferentes tiempos y gradientes.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Gradiente (S⁻¹)</i>				
	20	30	40	50	60
10	67	34	23	52	54
15	59	28	21	53	63
20	56	29	18	38	52
25	35	26	13	27	58
30	32	25	7	29	62
35	45	36	12	32	67

En las Tablas 81 y 82 se visualiza un acumulando de los resultados de las Tablas anteriores, los resultados obtenidos a gradientes de 20, 30 y 40 y tiempos de 20, 25 y 30 minutos fueron mejores, por lo tanto, se tomaron como referencia para el diseño experimental. En las Figuras 72 y 73 muestra la curva que representa el

comportamiento de la turbidez final a diferentes tiempos de retención y gradientes de velocidad, nuevamente se comprobó que los mejores tiempos corresponden a 20, 25 y 30 minutos y las mejores gradientes son las de 20, 30 y 40 debido a la configuración de la curva. Se ha logrado obtener la floculación óptima con un gradiente de 40 S-1 y 30 minutos de floculación, de acuerdo con Tripathy & Ranjan (2006) se logra la floculación óptima cuando las partículas desestabilizadas están cubiertas hasta la mitad con las cargas positivas adicionadas por el coagulante, por el contrario, si está cubierto totalmente, no existirá fuerzas de atracción que permitan que se formen flocs., asimismo también señalan que la gradiente de velocidad cuando sobrepasa el valor óptimo provoca el desgarre o fracturación de los flocs, generando restos muy pequeños que se unen entre sí y forman flocs pequeños cubiertos por carga positiva que ya no pueden constituir un floc más grande que alcance el volumen y peso necesario para sedimentar con facilidad (MRWA, 2009; TWT, 2010). Como se observa en las Tablas 81 y 82 y las Figuras 76 y 77, a medida que la gradiente de velocidad aumenta, también lo hace la eficiencia de remoción, esto ocurre hasta llegar a un gradiente óptimo de 40 S-1, para este gradiente el tiempo de mezcla óptimo es de 30 minutos en el que se obtuvo una turbidez de 3 y color de 7, en los diferentes casos posterior al tiempo y gradiente óptimos, los valores de color turbidez final volvieron a elevarse, respecto a esto Argaman y Kaufman citados por De Vargas (2009) demostraron que, para cada tiempo de floculación existe una gradiente de velocidad que optimiza el proceso, debajo de este valor no se consigue la misma eficiencia y al ser superado se rompe el floc formado, esto explica el patrón observado en el gráfico de líneas de las Figuras 76 y 77. Por otro lado Agaman & Kaufman citados por Vargas hallaron que mientras el gradiente es mayor, también se incrementa la velocidad de aglomeración de las partículas y que el tamaño máximo

estable de un floc depende en gran medida del gradiente de velocidad; a medida que el floc crece también lo hacen las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico producida por el gradiente de velocidad, una vez que se sobrepasa el máximo tamaño estable de un floc, esa fuerza es tan intensa q logra desfragmentarlo en partículas menores que no sedimentan fácilmente y causan colmatación de los filtros disminuyendo así la calidad del producto, la bibliografía consultada agrega que la aglomeración y ruptura del floc están estrechamente ligados al gradiente de velocidad (Andía, 2000; Minessota rural water association, 2009; Restrepo, 2009b; The water treatments, 2010; Tripathy & Ranjan, 2006).

Figura 76.

Curva turbidez final vs tipo de floculación

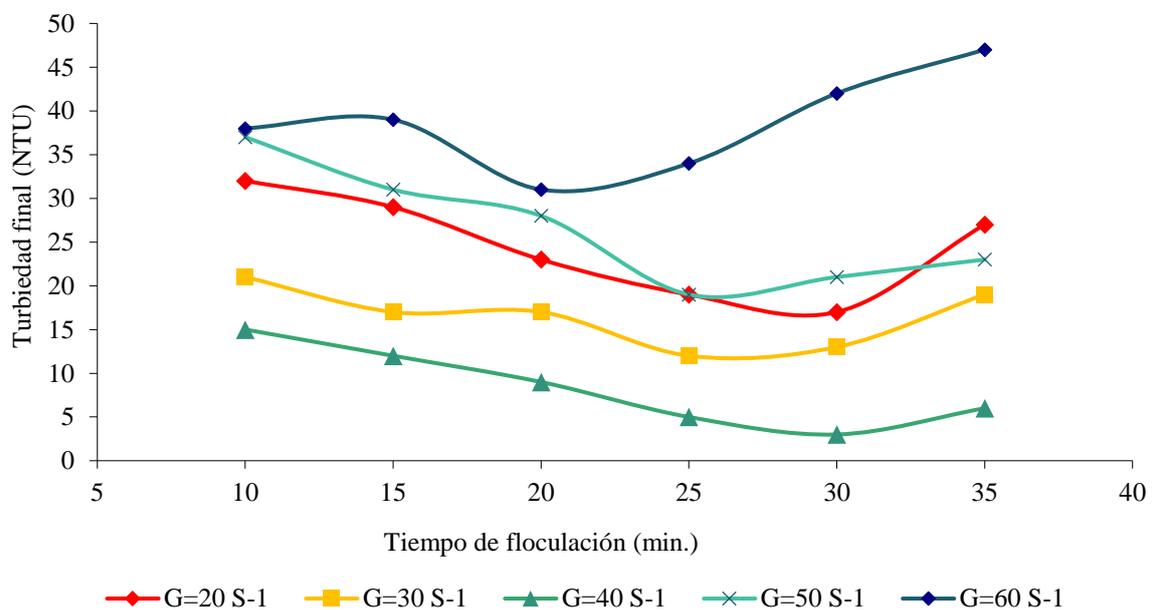
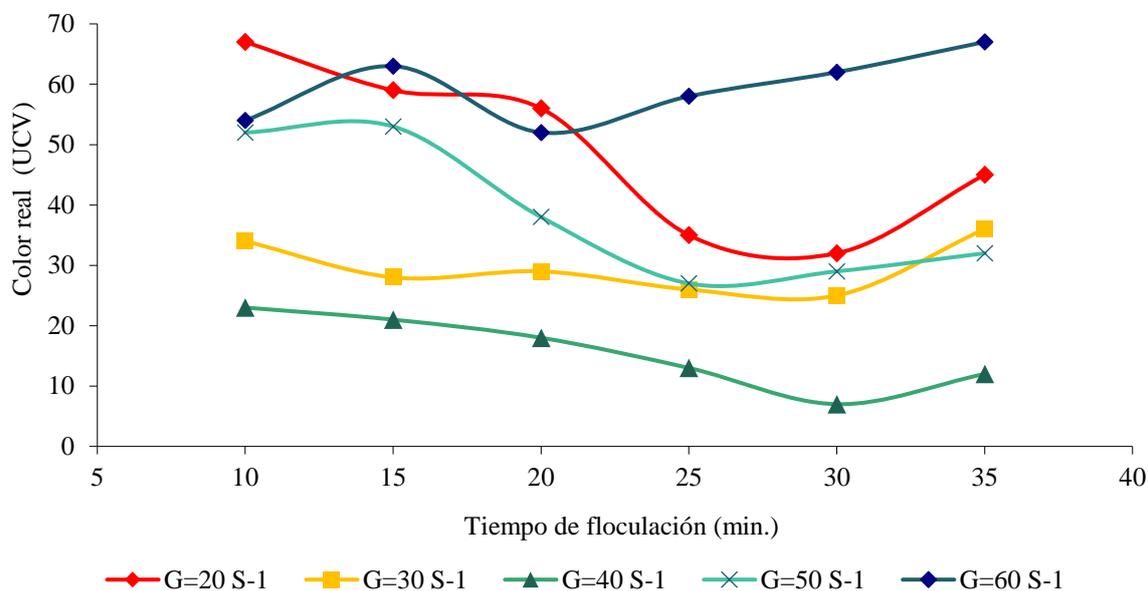


Figura 77.

Curva color real vs tiempo de floculación



4.17. Resultados de la prueba de tratabilidad para determinar la tasa de decantación

La prueba de decantación se realizó con los tiempos y gradientes óptimo de floculación obtenidos en las pruebas de tratabilidad realizadas (tiempo de 30 min y gradientes 20, 30 y 40 S^{-1}), se consideraron tres gradientes por los tres tramos de floculación que presenta la planta de Villa Rica y asimismo el tiempo de 30 minutos fue dividido en los tres tramos del floculador como se muestra en la Tabla 83.

Tabla 83.

Gradientes aplicados para la prueba de decantación

Tiempo (min)	Gradiente (S^{-1})	Velocidad (RPM)
10	40	32
10	30	28
10	20	20

Según el CEPIS, como regla general, si se agrega un gradiente de 20 S^{-1} en la etapa terminal del proceso de floculación, se logra un flóculo más pesado y compacto, con el que se obtienen las metas de calidad del proceso con una tasa de sedimentación más alta. Por lo tanto, el rango de gradientes de velocidad recomendable para esta agua estaría entre 60 y 20 S^{-1} , rango dentro del cual deberán estar las gradientes de velocidad de los cinco compartimentos

Tabla 84.

Resultados de la turbidez final alcanzada a diferentes tiempos

Tiempo seg	Velocidad cm/s	Turbidez final (UNT)	Ti / Tf
60	0.100	17.00	0.038
120	0.050	10.00	0.022
180	0.033	8.00	0.018
240	0.025	7.00	0.015
300	0.020	3.00	0.007
600	0.010	2.60	0.006

En la Tabla 84 se muestran los resultados de la turbidez final alcanzados con los diferentes tiempos establecidos en la prueba de tratabilidad.

Figura 78.

Curva de decantación

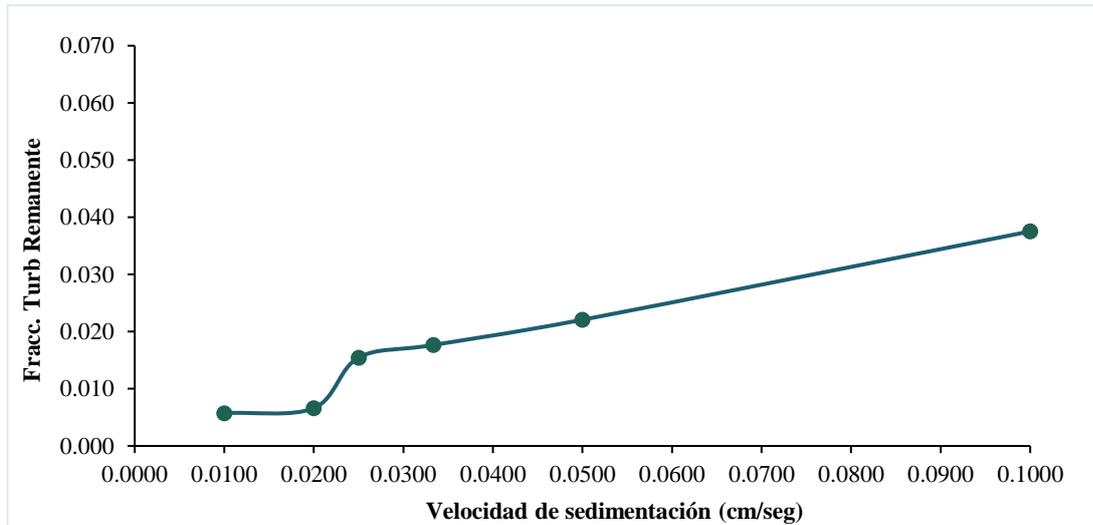


Tabla 85.

Proporción de turbiedad que no se removi6 en el proceso

a =	0.02 cm/s
Cf =	0.006

Donde:

a= Menor velocidad con que se justifica proyectar un decantador

Cf= Turbidez remanente

En la Figura 78 La curva tiene una porci6n inicial (lado izquierdo de la curva, en que se vuelve asint6tica; no importa cu6n largo sea el tiempo de sedimentaci6n que demos a la muestra, la turbiedad residual es la misma. Esta es la porci6n de turbiedad que solo puede ser removida por el filtro. El valor de (a) corresponde a esta velocidad a partir de la cual la curva comienza a hacerse asint6tica. Esta velocidad (a) es la menor velocidad con que se justificaría proyectar un decantador para esa agua, porque, aunque tom6ramos valores menores, la remoci6n ser6 la misma y estaríamos agrandando la unidad sin conseguir mayor eficiencia.

Tabla 86.

Resultados de la tasa de decantaci6n 6ptima

q m ³ /m ² /d	Vs cm/s	Co	Rt %	Tr	Ti
25	0.029	0.0120	0.999	452.56	0.4
30	0.035	0.0180	0.997	451.82	1.2
35	0.041	0.0200	0.996	451.36	1.6
40	0.046	0.0210	0.996	451.04	2.0
45	0.052	0.0225	0.995	450.66	2.3
50	0.058	0.0230	0.994	450.44	2.6

CEPIS considera que para la tasa de decantación se coloca el rango usual de variación de las tasas de sedimentación de las partículas (20 a 60 m³/m²/d), variándolas de 10 en 10. Deducir los valores correspondientes de (Vs) en cm/s para cada tasa, en las pruebas consideramos una variación de 5 en 5 con el fin de tener mejores resultados, la turbidez deseada en la salida de los decantadores es de 2 UNT de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio, la tasa de decantación que nos permite obtener dicho resultado es de 40 m³/m²/d. A partir de este dato hallamos la tasa de decantación real con un coeficiente de seguridad de 30% arrojando un resultado de 30.77 m³/m²/d.

Tabla 87. *Resumen de los resultados de las pruebas de tratabilidad*

Pruebas de tratabilidad	Concentración del insumo químico (%)	Dosis óptima (mg/L)		Turbidez final (UNT)		Color final (UCV)		Porcentaje de remoción (%)		
		M1: 23 UNT	M2: 453 UNT	M1: 23 UNT	M2: 453 UNT	M1:23 UNT	M2: 453 UNT	M1:23 UNT	M2: 453 UNT	
Resultados de las pruebas de tratabilidad aplicando diferentes coagulantes sintéticos	Sulfato de Aluminio granulado tipo A		30	55	9	7	19	26	61	98.5
	Sulfato de Aluminio en solución tipo A	2.5	25	50	14	17	47	41	39	96.2
	Cloruro férrico		25	55	15	32	57	37	35	92.9
	Policloruro de Aluminio (PAC)		30	50	12	11	20	39	48	97.6
Resultados de las pruebas de tratabilidad a diferentes niveles de pH aplicando sulfato de aluminio granulado tipo A	pH Natural del agua (7.22)	-	30	-	8		20	-	65	
Resultado de las pruebas de tratabilidad con sulfato de aluminio granulado tipo A con diferentes dosis de polímero catiónico como ayudante de coagulación	Sulfato de aluminio granulado tipo A y polímero catiónico	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 2.5% Polímero catiónico = 0.023%	-	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 34 Pol. Catiónico = 0.25	15	8	-	-	35	98.2
Resultado de las pruebas de tratabilidad con sulfato de aluminio granulado tipo A con diferentes dosis de polímero catiónico como ayudante de floculación	Sulfato de aluminio granulado tipo A y polímero catiónico	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 2.5% Polímero catiónico = 0.023%	-	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 58 Pol. Catiónico = 0.20	10	6	-	-	57	98.7
Resultado de las pruebas de tratabilidad con diferentes tiempos y gradientes aplicando sulfato de aluminio granulado tipo A	Gradiente de velocidad = 40 S-1 Tiempo de floculación = 30 min	2.5	30	55	2	3	6	7	91	99.3

4.18. Resultados del diseño experimental Box-Behnken

Conforme a lo antes mencionado, se tomaron en cuenta las pruebas de tratabilidad para determinar los niveles de los factores: Dosis de coagulante (mg/L), tiempo de agitación (min) y gradientes de velocidad (S^{-1}); es fundamental expresar que la primera muestra de agua posee niveles de turbidez y color bajos (23 UNT y 195 UCV) y la segunda muestra contiene turbidez y color altos (453 UNT y 825 UCV), en efecto los niveles de cada factor fueron diferentes para cada muestra de agua. En la Tabla 88 se muestran las variables con sus respectivos niveles que fueron insertadas al Software Statistica.

Tabla 88.

Combinaciones de factores y niveles para el diseño estadístico

Variables independientes	Nivel			Variables dependientes
	-1	0	1	
Muestra de agua con turbidez baja				
Dosis de coagulante (mg/L)	25	30	35	Turbidez final (UNT)
Tiempo de retención (min)	25	30	35	Eficiencia de remoción de turbidez
Gradientes de velocidad (S^{-1})	30	40	50	Color real (UCV)
				Eficiencia de remoción de color
Muestra de agua con turbidez alta				
Dosis de coagulante (mg/L)	50	55	60	Turbidez final (UNT)
Tiempo de retención (min)	25	30	35	Eficiencia de remoción de turbidez
Gradientes de velocidad (S^{-1})	30	40	50	Color real (UCV)
				Eficiencia de remoción de color

De acuerdo a las pruebas de tratabilidad, los mejores resultados de reducción de color y turbidez se han logrado con dosis de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ de 30 mg/L y 55 mg/L, por otro lado, los resultados más bajos de turbidez y color se han logrado con tiempos de retención de 30 minutos con un gradiente de velocidad de 40 S^{-1} .

4.18.1. Resultados de las Pruebas para agua con color y turbidez bajos

4.18.1.1. **Reducción de turbidez.** En la Tabla 89 se presentan las dosis, gradientes y tiempos empleados con sus respectivos niveles. Se observa también la turbidez inicial, final y el porcentaje de remoción obtenido por cada combinación de factores, se observa que las últimas 5 corridas que se realizaron con los niveles óptimos de cada factor lograron los mejores porcentajes de remoción (90% aproximadamente).

Tabla 89.

Resultado de la combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez baja.

Corrida	Tiempo (min)	Dosis (mg/L)	Gradiente (S ⁻¹)	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final (UNT)	% remoción
1	25	25	40	23	7	69.57
2	35	25	40		11	52.17
3	25	35	40		5	78.26
4	35	35	40		10	56.52
5	25	30	30		10	56.52
6	35	30	30		17	26.09
7	25	30	50		15	34.78
8	35	30	50		19	17.39
9	30	25	30		10	56.52
10	30	35	30		9	60.87
11	30	25	50		20	13.04
12	30	35	50		18	21.74
13	30	30	40		4	82.61
14	30	30	40		3	86.96
15	30	30	40		2	91.30
16	30	30	40		3	86.96
17	30	30	40		2	91.30

Tabla 90.

Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de reducción de turbidez.

Factores	SS	df	MS	F	p
(1) Tiempo (min) (L)	945.18	1	945.18	71.43	0.001*
Tiempo (min) (Q)	827.83	1	827.83	62.56	0.001*
(2) Dosis (mg/L) (L)	85.07	1	85.07	6.43	0.064
Dosis (mg/L) (Q)	394.04	1	394.04	29.78	0.005*
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	1597.35	1	1597.35	120.71	0.000*
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	6773.51	1	6773.51	511.88	0.000*
1L by 2L	4.73	1	4.73	0.36	0.582

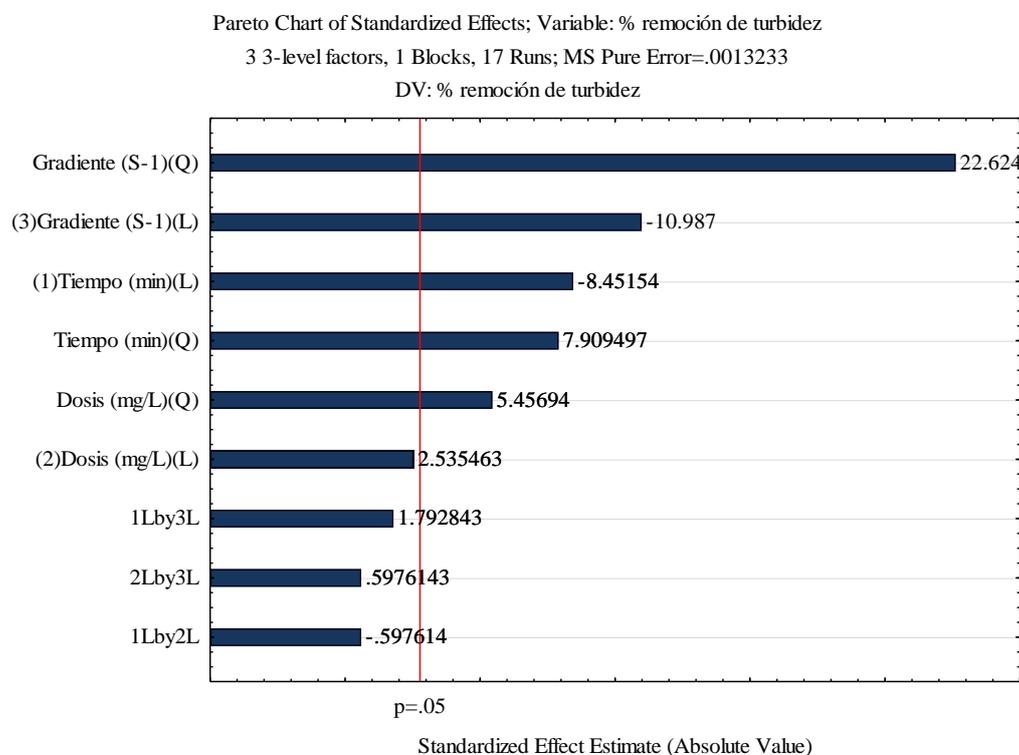
1L by 3L	42.53	1	42.53	3.21	0.147
2L by 3L	4.73	1	4.73	0.36	0.582
Lack of fit (Falta de ajuste)	349.72	3	116.57	8.81	0.031*
Pure error	52.93	4	13.23		
Total, SS	11635.72	16			
R ²	96.5%				
R ² Adj	92.1%				

(*) p<0.05, efecto significativo / L=Lineal, Q=Cuadrático

En la Tabla 90 se presentan los resultados del análisis de varianza, asimismo se observa el coeficiente de determinación obtenido (R^2) y el valor de p. En los resultados el coeficiente de determinación fue de (R^2) =96.5% y el coeficiente de determinación ajustado fue (R-adj) =92.1% empleando un nivel de confianza de 95%, esto indica que el modelo lineal-cuadrático empleado se ajusta casi en su totalidad a los datos experimentales. Por otro lado, los factores lineales y cuadráticos de gradiente y tiempo tienen un valor de p inferior a 0.05 lo que indica que tienen efecto significativo sobre la variable respuesta, que el modelo estadístico aplicado explica la variación de la respuesta y los resultados se ajustan a una distribución normal.

Figura 79.

Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de turbidez



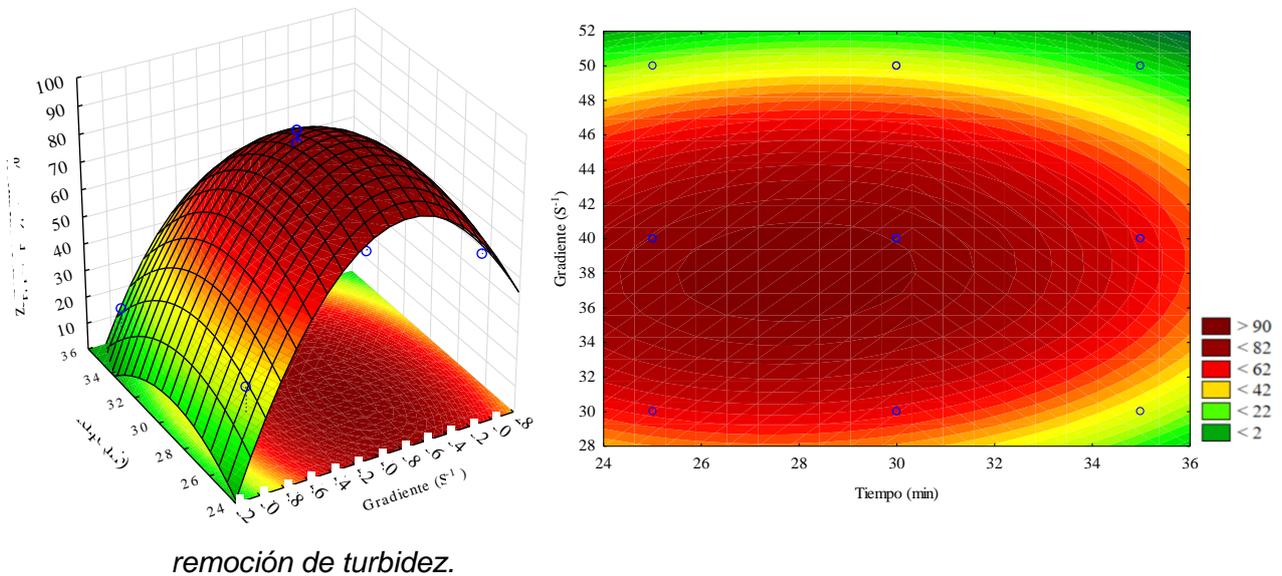
En la Figura 79 se aprecia el diagrama de Pareto que muestra de manera gráfica los factores más importantes que influyen en la turbidez final del agua, los valores que sobrepasan la línea de referencia son los factores significativos. De esta manera se observa que el factor que más influye en la turbidez final del agua es el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación lineal y cuadrático. De Vargas (2004a) afirma claramente que estos 2 parámetros operacionales son los que más influyen en el tratamiento del agua, lo cual es confirmado por los resultados obtenidos y por los diversos estudios realizados; la causa es que ambos factores actúan en conjunto para la formación de flocs estables y con el peso necesario para sedimentar, sin embargo si no se los niveles óptimos se formar flocs muy pequeños y de poco peso o pueden llegar a fracturarse (Clavijo, 2013; Diaz, 2017; MRWA, 2009). Aparte de ello, en las pruebas de tratabilidad para hallar la dosis óptima de coagulante

realizadas en la presente investigación se aplicaron el tiempo de floculación y el gradiente de velocidad con los que opera la planta de tratamiento y en ninguna de las pruebas se ha logrado resultados de turbidez menor al límite máximo permisible por lo cual se puede evidenciar que la gradiente de velocidad y el tiempo de floculación tienen mayor efecto sobre el tratamiento de aguas.

Figura 80.

Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la

Fitted Surface; Variable: **% remoción de turbidez**. 3 3-level factors, 1 Blocks, 17 Runs



En la Figura 80 se presenta un gráfico de superficie de respuesta en dos y tres dimensiones, se realizó la predicción de la variable dependiente (variable respuesta) mostrada en los gráficos de la Figura 80 a través del siguiente modelo matemático (ecuación de regresión):

$$\% \text{ remoción turbidez} = -1239.56 + 30.17 * x - 0.56 * x^2 + 28.06 * y - .4 * y^2$$

Donde:

Z=%remoción de turbidez

X = Tiempo de floculación

Y=Gradiente de velocidad

Se observa que se ha optimizado el proceso para el presente caso y hay mayor porcentaje de remoción cuando el gradiente de velocidad está entre 37 y 40 S^{-1} y el tiempo entre 26 y 30 minutos, de esta manera el método de superficie de respuesta indica que con estos valores se logra la mejor eficiencia en la remoción de turbidez, asimismo el modelo de superficie de respuesta respalda el resultado de las pruebas realizadas anteriormente en las que se obtuvo resultados similares.

4.18.1.2. **Reducción de color.** A continuación, se muestra en la Tabla 91 la combinación de niveles y resultados que se obtuvieron del software Statistica v13.4 para 3 variables con 3 niveles.

Tabla 91.

Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez baja.

Corrida	Tiempo (min)	Dosis (mg/L)	Gradiente (S^{-1})	Color inicial (UCV)	Color final (UCV)	% remoción
1	25	25	40		13	93.33
2	35	25	40		21	89.23
3	25	35	40		6	96.92
4	35	35	40		16	91.79
5	25	30	30		19	90.26
6	35	30	30		39	80.00
7	25	30	50		34	82.56
8	35	30	50		46	76.41
9	30	25	30	195	33	83.08
10	30	35	30		19	90.26
11	30	25	50		48	75.38
12	30	35	50		43	77.95
13	30	30	40		4	97.95
14	30	30	40		6	96.92
15	30	30	40		3	98.46
16	30	30	40		4	97.95
17	30	30	40		6	96.92

Tabla 92.

Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de remoción de turbidez.

Factores	SS	df	MS	F	p
(1) Tiempo (min) (L)	82.18	1	82.18	173.6	0.0002*

Tiempo (min) (Q)	18.39	1	18.39	38.8	0.0034*
(2) Dosis (mg/L) (L)	31.59	1	31.59	66.7	0.0012*
Dosis (mg/L) (Q)	31.40	1	31.40	66.3	0.0012*
(3) Gradiente (S^{-1}) (L)	122.32	1	122.32	258.4	0.0001*
Gradiente (S^{-1}) (Q)	738.50	1	738.50	1560.1	0.0000*
1L by 2L	0.26	1	0.26	0.6	0.4975
1L by 3L	4.21	1	4.21	8.9	0.0407*
2L by 3L	5.33	1	5.33	11.3	0.0285*
Lack of fit (Falta de ajuste)	17.55	3	5.85	12.4	0.0172*
Pure error	1.89	4	0.47		
Total SS	1090.99	16			
R ²	98.3%				
R ² Adj	95.9%				

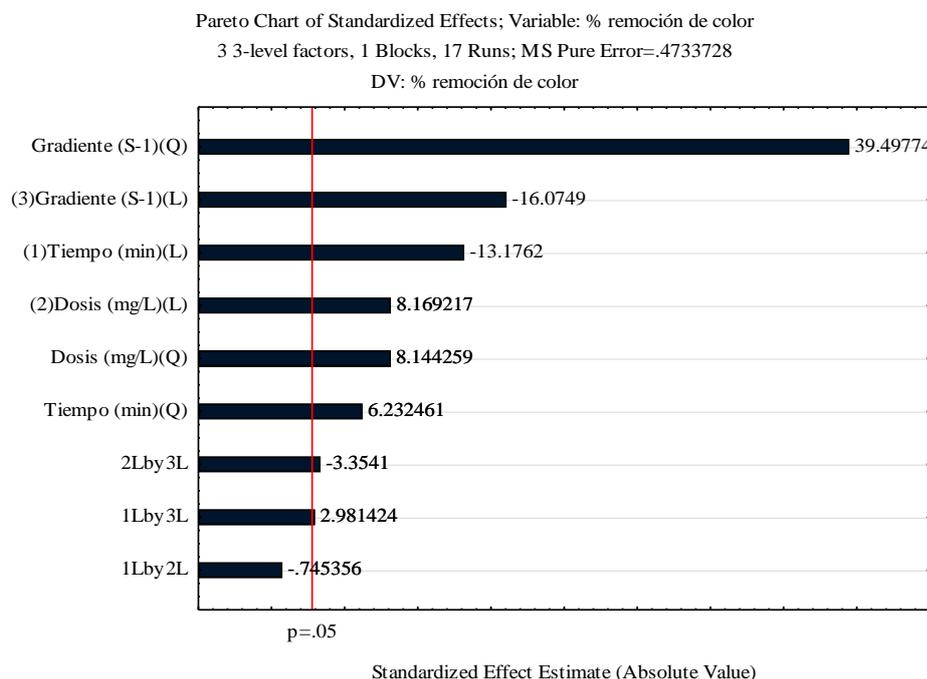
(*) $p < 0.05$, efecto significativo

L=Lineal, Q=Cuadrático

En la Tabla 92 se presentan los resultados del análisis de varianza, asimismo se observa el coeficiente de determinación obtenido (R^2) y el valor de p. En los resultados el coeficiente de determinación fue de (R^2) =98.3% y coeficiente de determinación ajustado (R-adj) =95.9% empleando un nivel de confianza de 95%. De acuerdo a Montgomery (2011), esto significa que el modelo lineal-cuadrático empleado se ajusta en un 98% a los datos experimentales de la investigación. Por otro lado, los factores lineales y cuadráticos de gradiente y tiempo que presentan un valor de p inferior a 0.05 tienen efecto significativo sobre la variable respuesta, también explican que el modelo estadístico aplicado explica la variación de la respuesta y los resultados se ajustan a una distribución normal.

Figura 81.

Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de color

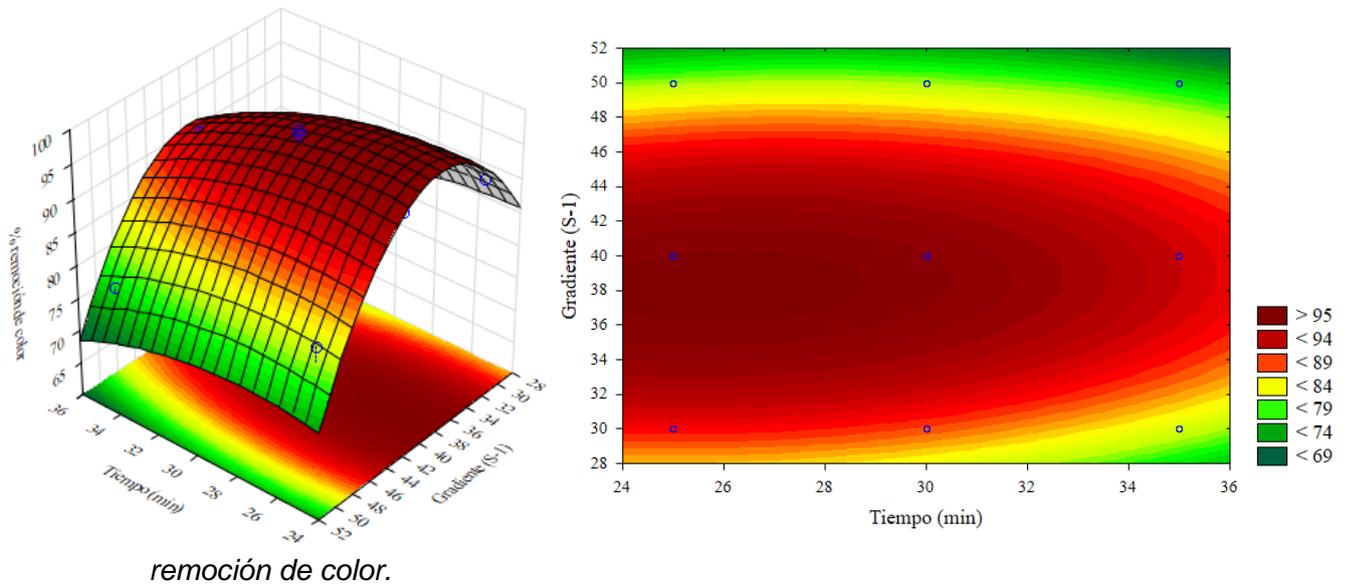


En la Figura 81 se presenta de manera gráfica la influencia de los 3 factores en la remoción de color, los valores que sobrepasan la línea de referencia son los factores que tienen efecto más significativo sobre la respuesta. De esta manera se observa que los factores que más influyen en la remoción de color del agua son el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación lineal y cuadrático, esto coincide con la bibliografía consultada pues ambos son los parámetros que más influyen en el tratamiento del agua, pues el gradiente y el tiempo trabajan en conjunto en la formación de flocs suficientemente estables para no fraccionarse y suficientemente pesados para sedimentar (Comisión Nacional del Agua, 2016; J. Pérez, 2017; Tafur, 2017). Cabe señalar también que, en las pruebas de tratabilidad para hallar la dosis óptima de coagulante realizadas en la presente investigación se aplicaron el tiempo de floculación y el gradiente de velocidad con los que opera la planta de tratamiento y en ninguna de las pruebas se ha logrado resultados de color menor al límite máximo

permisible por lo cual confirma que la gradiente de velocidad y el tiempo de floculación tienen efecto muy significativo en el tratamiento de aguas.

Figura 82.

Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la
 Fitted Surface; Variable: % **remoción de color**. 3 3-level factors, 1 Blocks, 17 Runs



En la Figura 82 se presenta un gráfico de superficie de respuesta y superficie de contorno, la predicción de la variable dependiente (variable respuesta) mostrada en tres dimensiones se realizó a través del siguiente modelo matemático (ecuación de regresión):

$$\% \text{remoción color} = -277.15 + 3.86 * x - 0.83 * x^2 + 10.28 * y - 0.13 * y^2$$

Donde:

Z=%remoción de turbidez

X = Tiempo de floculación

Y=Gradiente de velocidad

Se observa que se ha optimizado el proceso para el presente caso y hay mayor porcentaje de remoción cuando el gradiente de velocidad está entre 36 y 40 S⁻¹ y el tiempo entre 24 y 28 minutos, de esta manera el método de superficie de respuesta indica que con estos valores se logra la mejor eficiencia en la remoción de color,

asimismo el modelo de superficie de respuesta respalda el resultado de las pruebas realizadas anteriormente en las que se obtuvo resultados similares.

4.18.2. Resultado de las pruebas para agua con color y turbidez altos

4.18.2.1. Reducción de turbidez. En la Tabla 93 se presenta la combinación de niveles que se obtuvieron del software Statistica v13.4. Se muestran los tres niveles óptimos de los tres factores que se emplearon, en la tabla se puede observar el resultado de las 17 corridas realizadas combinando los distintos niveles de los factores.

Tabla 93.

Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez alta.

Corrida	Tiempo (min)	Dosis (mg/L)	Gradiente (S ⁻¹)	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final (UNT)	Remoción (%)
1	25	50	40		15	96.69
2	35	50	40		13	97.13
3	25	60	40		23	94.92
4	35	60	40		22	95.14
5	25	55	30		18	96.03
6	35	55	30		19	95.81
7	25	55	50		21	95.36
8	35	55	50		23	94.92
9	30	50	30	453	25	94.48
10	30	60	30		36	92.05
11	30	50	50		25	94.48
12	30	60	50		38	91.61
13	30	55	40		3	99.34
14	30	55	40		2	99.56
15	30	55	40		3	99.34
16	30	55	40		2	99.56
17	30	55	40		3	99.34

Los resultados muestran que se logró mayor eficiencia de remoción de turbidez en las últimas cinco corridas, los porcentajes de remoción están por encima de los 99%; esto se debe a que para dichas corridas o experimentos se emplea el nivel más óptimo de cada factor, por otro lado, los diseños de superficie de respuesta sirven para optimizar procesos por lo cual obtienen los mejores resultados combinando los

niveles centrales de los factores, en el presente caso, se combinó la gradiente de 40 S⁻¹, dosis de 55 mg/L y tiempo de 30 minutos para lograr valores de turbidez de 2 UNT que están por debajo del límite máximo permisible.

Tabla 94.

Análisis de varianza ANOVA

Factores	SS	df	MS	F	p
(1) Tiempo (min) (L)	0.00	1	0.00	0.00	1.000
Tiempo (min) (Q)	1.23	1	1.23	84.25	0.001*
(2) Dosis (mg/L) (L)	10.24	1	10.24	700.42	0.000*
Dosis (mg/L) (Q)	35.75	1	35.75	2445.47	0.000*
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	0.49	1	0.49	33.75	0.004*
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	47.41	1	47.41	3242.67	0.000*
1L by 2L	0.01	1	0.01	0.83	0.413
1L by 3L	0.01	1	0.01	0.83	0.413
2L by 3L	0.05	1	0.05	3.33	0.142
Lack of fit	0.67	3	0.22	15.28	0.012*
Pure error	0.06	4	0.01		
Total, SS	102.62	16			
R ²	99.3%				
R ² Adj	98.3%				

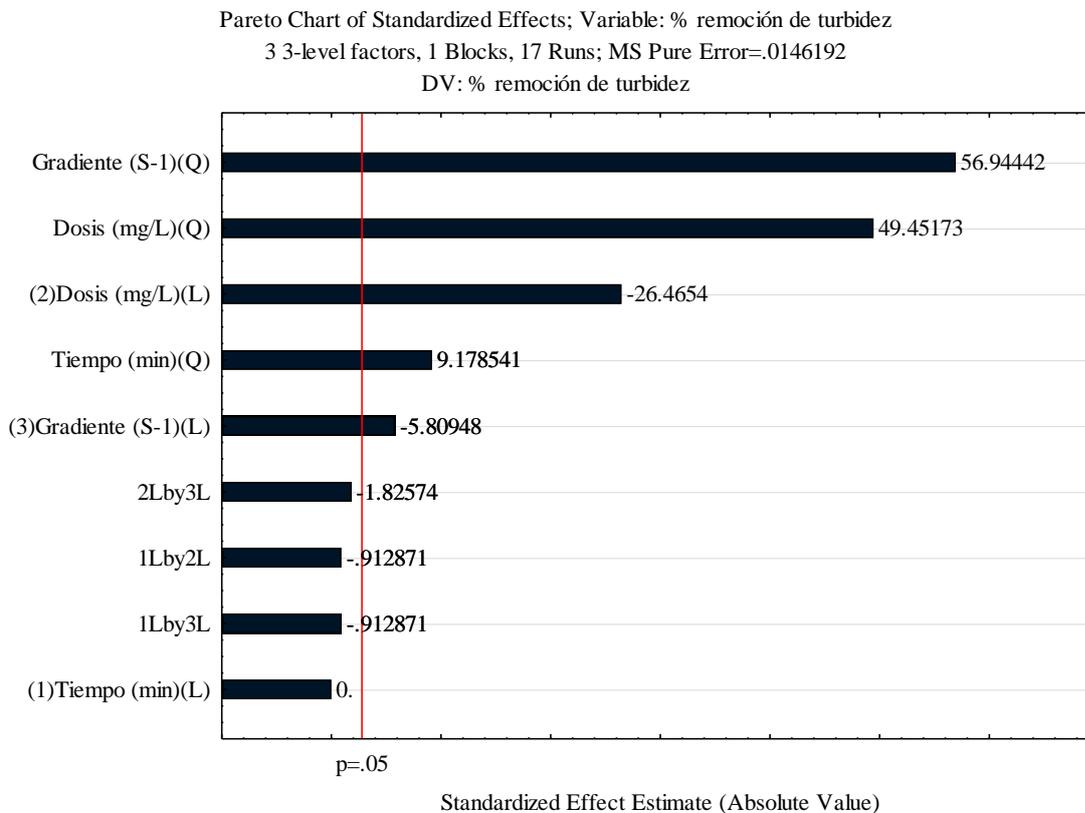
(*) p<0.05, efecto significativo

L=Lineal, Q=Cuadrático

En la Tabla 94 se presentan los resultados del análisis de varianza, asimismo se observa el coeficiente de determinación obtenido (R²) y el valor de p. En los resultados el coeficiente de determinación fue de (R²) =99.3% y coeficiente de determinación ajustado (R-adj) =98.3% empleando un nivel de confianza de 95%, indicando que el modelo estadístico aplicado se ajusta en un 99% a los datos experimentales del estudio. Por otro lado, los factores lineales y cuadráticos de gradiente y tiempo que tienen un valor de p inferior a 0.05 influyen significativamente sobre la variable respuesta, asimismo el modelo estadístico permite explicar la variación de la respuesta y los resultados se ajustan a una distribución normal.

Figura 83.

Diagrama de Pareto para la reducción de turbidez.



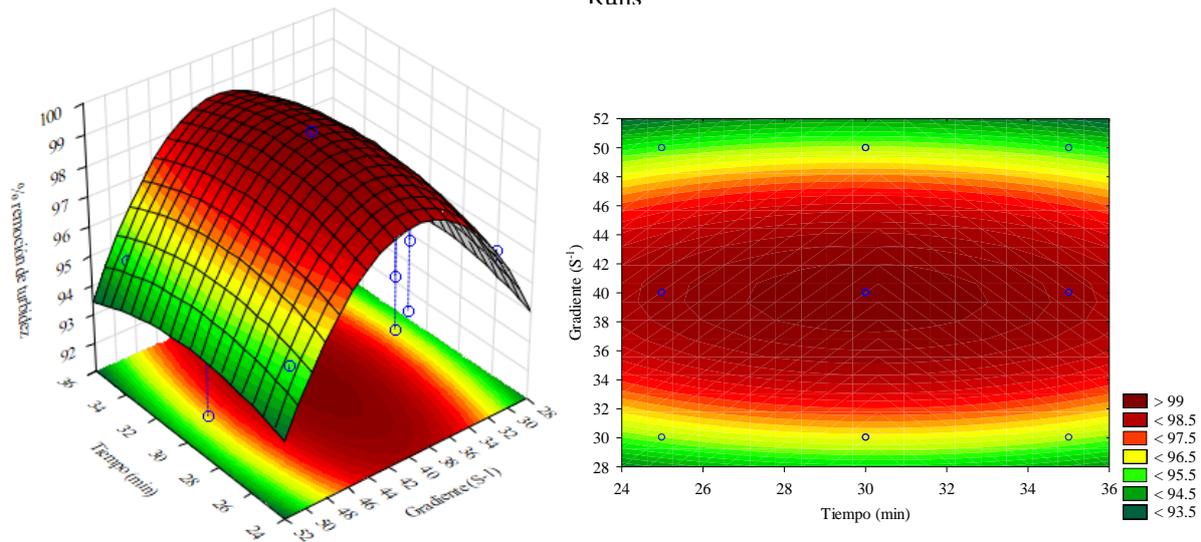
En la Figura 83 se presenta de manera gráfica la influencia de los 3 factores en la remoción de color, los valores que sobrepasan la línea de referencia son los factores que tienen efecto más significativo sobre la variable respuesta, los factores que más influyen en la remoción de color del agua son el gradiente de velocidad y la dosis óptima de coagulante. Como ya se ha mencionado, la gradiente de velocidad tiene un efecto muy significativo en el proceso de floculación para favorecer la formación de flocs suficientemente estables y con tamaño y peso adecuado para sedimentar rápidamente; sin embargo dado que el nivel de turbidez de la muestra fue muy elevado, la dosis de coagulante toma un papel muy importante en la floculación, pues de acuerdo a estudios anteriores y la bibliografía consultada, cuando la turbidez inicial es muy elevada la dosis de coagulante necesaria aumenta e influye de manera

significativa sobre la remoción de turbidez (Castrillón & Ángeles, 2012; De Vargas, 2004a; Rinne, 2010).

Figura 84.

Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la

Fitted Surface; Variable: % **remoción de turbidez**. 3 3-level factors, 1 Blocks, 17 Runs



remoción de turbidez.

En la Figura 84 se presenta un gráfico de superficie de respuesta y superficie de contorno, la predicción de la variable dependiente (variable respuesta) mostrada en tres dimensiones se realizó a través del siguiente modelo matemático (ecuación de regresión):

$$\% \text{ remoción turbidez} = -322.69 + 1.46 * x - .021 * x^2 + 2.81 * y - .033 * y^2$$

Donde:

Z=%remoción de turbidez

X = Tiempo de floculación

Y=Gradiente de velocidad

Se observa que se ha optimizado el proceso para el presente caso y hay mayor porcentaje de remoción cuando el gradiente de velocidad está entre 39 y 41 S⁻¹ y el

tiempo entre 28 y 32 minutos, de esta manera el método de superficie de respuesta indica que con estos valores se logra la mejor eficiencia en la remoción de turbidez, asimismo el modelo de superficie de respuesta respalda el resultado de las pruebas realizadas anteriormente en las que se obtuvo resultados similares.

4.18.2.2. Reducción de color

En la Tabla 95 se presentan las dosis, gradientes y tiempos empleados con sus respectivos niveles. Se observa también el color inicial, final y el porcentaje de remoción obtenido por cada combinación de factores, se observa que las últimas 5 corridas que se realizaron con los niveles óptimos de cada factor lograron en promedio un porcentaje de remoción de 99%.

Tabla 95.

Combinación de niveles del diseño Box-Behnken para 3 variables con 3 niveles – Turbidez

Corrida	Tiempo (min)	Dosis (mg/L)	Gradiente (S ⁻¹)	Color inicial (UCV)	Color final (UCV)	% remoción	<i>alta.</i>
1	25	50	40		17	97.94	
2	35	50	40		18	97.82	
3	25	60	40		20	97.58	
4	35	60	40		22	97.33	
5	25	55	30		30	96.36	
6	35	55	30		38	95.39	
7	25	55	50		30	96.36	
8	35	55	50		35	95.76	
9	30	50	30	825	35	95.76	
10	30	60	30		38	95.39	
11	30	50	50		40	95.15	
12	30	60	50		42	94.91	
13	30	55	40		7	99.15	
14	30	55	40		5	99.39	
15	30	55	40		6	99.27	
16	30	55	40		6	99.27	
17	30	55	40		7	99.15	

Los resultados muestran que se logró mayor eficiencia de remoción de turbidez en las últimas cinco corridas, los porcentajes de remoción están por encima de los 99%; esto se debe a que para dichas corridas o experimentos se emplea el nivel más

óptimo de cada factor, por otro lado, de acuerdo a Montgomery (2011) los diseños de superficie de respuesta sirven para optimizar procesos por lo cual se espera que se obtengan los mejores resultados combinando los niveles centrales de los factores, en el presente caso, se combinó la gradiente de 40 S^{-1} , dosis de 55 mg/L y tiempo de 30 minutos para lograr valores de color de 6 UCV que están por debajo del límite máximo permisible.

Tabla 96. *Análisis de varianza ANOVA, se detallan las varianzas de los datos de remoción de color.*

Factores	SS	df	MS	F	p
(1) Tiempo (min) (L)	0.47	1	0.47	45.71	0.002*
Tiempo (min) (Q)	0.88	1	0.88	85.72	0.001*
(2) Dosis (mg/L) (L)	0.26	1	0.26	25.71	0.007*
Dosis (mg/L) (Q)	5.32	1	5.32	517.45	0.000*
(3) Gradiente (S^{-1}) (L)	0.07	1	0.07	6.43	0.064
Gradiente (S^{-1}) (Q)	33.51	1	33.51	3258.50	0.000*
1L by 2L	0.00	1	0.00	0.36	0.582
1L by 3L	0.03	1	0.03	3.21	0.147
2L by 3L	0.00	1	0.00	0.36	0.582
Lack of fit (Falta de ajuste)	0.46	3	0.15	14.76	0.013*
Pure error	0.04	4	0.01		
Total, SS	43.63	16			
R ²	98.7%				
R ² Adj	97.4%				

(*) $p < 0.05$, efecto significativo

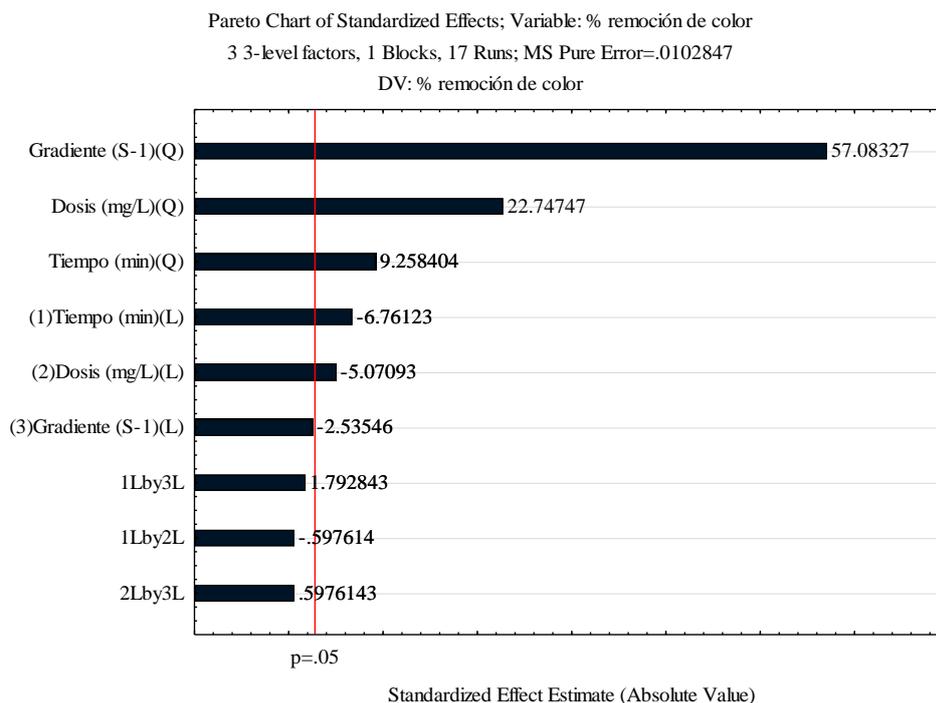
L=Lineal, Q=Cuadrático

En la Tabla 96 se presentan los resultados del análisis de varianza, asimismo se observa el coeficiente de determinación obtenido (R^2) y el valor de p. En los resultados el coeficiente de determinación fue de (R^2) =98.7% y coeficiente de determinación ajustado (R-adj) =97.4% empleando un nivel de confianza de 95%, indicando que el modelo estadístico aplicado se ajusta en un 98% a los datos empleados en la presente investigación. Es importante también señalar que los factores lineales y cuadráticos de gradiente y tiempo que presentan un valor de p

inferior a 0.05 tienen efecto significativo sobre la variable respuesta (remoción de color), además, ya que el modelo se ajusta en un 98% se puede afirmar que este modelo lineal-cuadrático aplicado permite explicar la variación de la respuesta casi en su totalidad y los resultados se ajustan a una distribución normal.

Figura 85.

Diagrama de Pareto de Box-Behnken para reducción de turbidez



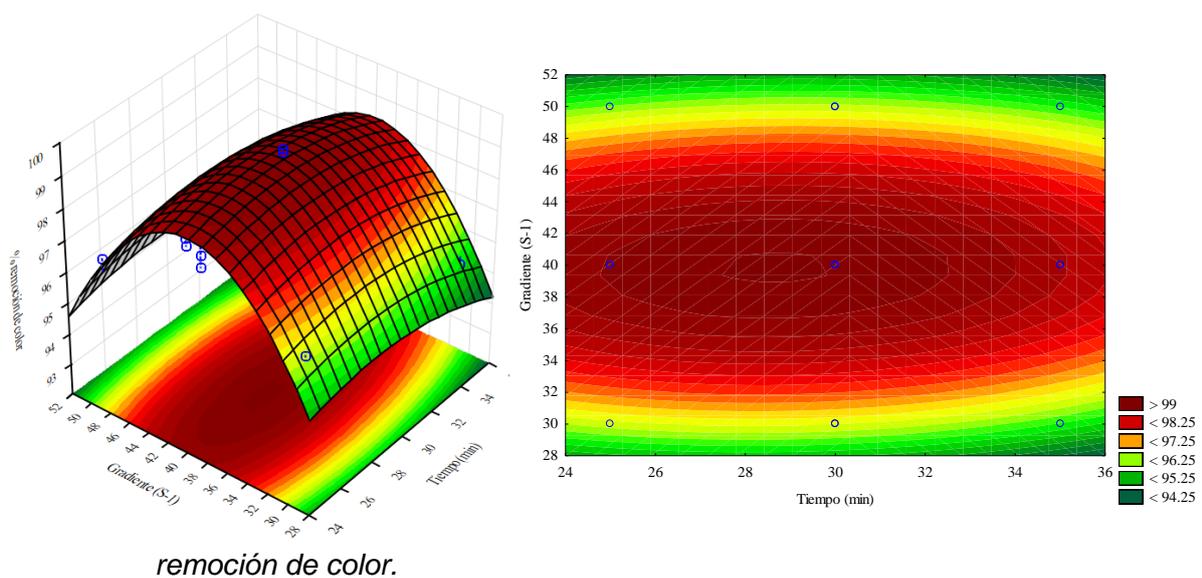
En la Figura 85 se presenta de manera gráfica la influencia de los 3 factores en la remoción de color, los factores que sobrepasan la línea de referencia son los que tienen efecto más significativo sobre la remoción de color, de esta manera se observa que los factores que más influyen en la remoción de color del agua son el gradiente de velocidad y la dosis de coagulante, ya se ha mencionado el efecto muy significativo que tiene la gradiente de velocidad en la formación de flocs suficientemente estables para sedimentar, sin embargo dado que el nivel de color fue muy elevado la dosis de coagulante toma un papel muy importante en la floculación, esto sucede lo que le agrega color al agua son partículas coloidales cargadas

negativamente que son hidrofílicas por lo que reaccionan con el agua y es más difícil su remoción; esto causa que se incremente la dosis requerida para remover el color (Castrillón & Ángeles, 2012; De Vargas, 2004a; Rinne, 2010).

Figura 86.

Superficie de respuesta tiempo de retención y gradiente de velocidad para la

Fitted Surface; Variable: % **remoción de color**. 3 3-level factors, 1 Blocks, 17 Runs



En la Figura 86 se presenta un gráfico de superficie de respuesta y superficie de contorno, la predicción de la variable dependiente (variable respuesta) mostrada en tres dimensiones se realizó a través del siguiente modelo matemático (ecuación de regresión):

$$\% \text{ remoción color} = -93.06 + 1.04 * x - 0.018 * x^2 + 2.15 * y - 0.028 * y^2$$

Donde:

Z=%remoción de turbidez

X = Tiempo de floculación

Y=Gradiente de velocidad

Se observa que se ha optimizado el proceso para el presente caso y hay mayor porcentaje de remoción cuando el gradiente de velocidad es de $40S^{-1}$ y el tiempo de floculación entre 28 y 30 minutos, de esta manera el método de superficie de respuesta indica que con estos valores se logra la mejor eficiencia en la remoción de turbidez, asimismo el modelo de superficie de respuesta respalda el resultado de las pruebas realizadas anteriormente en las que se obtuvo resultados similares.

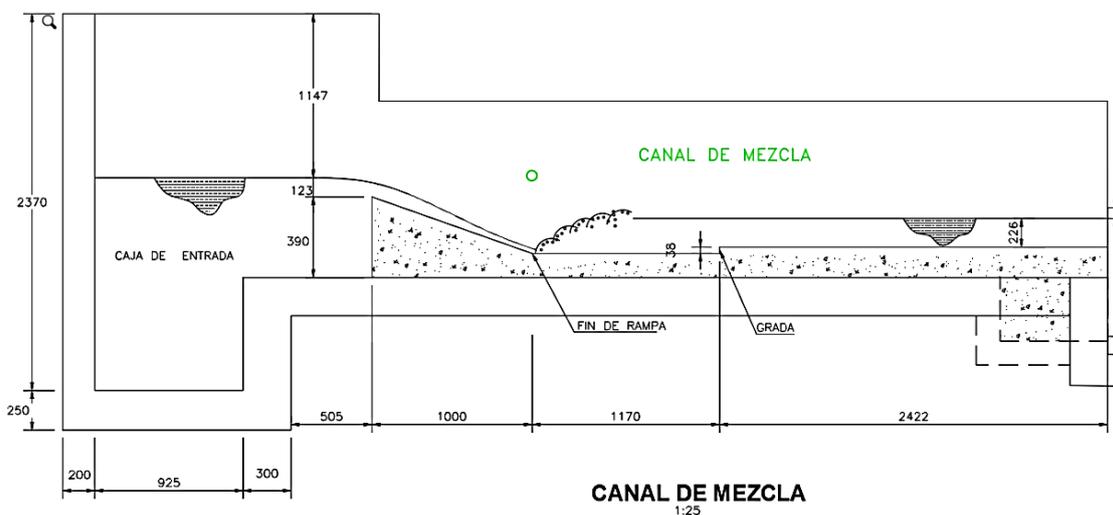
4.19. Resultados de evaluación de planta

4.19.1. Unidad de mezcla rápida

4.19.1.1. Observaciones de la unidad de mezcla rápida

Figura 87.

Vista en corte de la unidad de mezcla rápida



En la Figura 87 se muestra la vista en corte de la unidad de mezcla rápida con las dimensiones que presenta unidad actualmente. Las deficiencias que se identificaron son los siguientes:

- La dosificación se realiza antes del punto de turbulencia máximo, lo cual puede afectar la eficiencia del tratamiento. La gradiente de velocidad para este escenario es de 903 S^{-1} , lo cual se encuentra dentro del rango óptimo de 700 a 1300 S^{-1} . La turbulencia se genera antes del término de la rampa. Véase la Figura 88
- Cerón (2016) menciona que el sulfato de aluminio debe distribuirse a través de toda la masa de agua rápidamente, con el fin de que se logre el contacto con todas las partículas coloidales antes de que se presente la formación de las especies menos deseables. Esto se logra mediante una mezcla instantánea que provea una buena distribución del coagulante en el menor tiempo posible.
- La OS 020 y CEPIS indican que el mezclador debe garantizar una mezcla completa por lo que se debe obtener una distribución instantánea y uniforme del coagulante aplicado al agua, también considera recomendable el uso de vertederos rectangulares para caudales menores a 100 l/s, la planta cuenta con un canal rectangular con cambio de pendiente (De Vargas, 2004b, 2004c; Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2009).

Figura 88.

El punto de aplicación se ubica antes de la turbulencia máxima.



- La tubería de dosificación de coagulante está conformada por un tubo de PVC de 3" cortado a la mitad, el cual presenta orificios como se muestra en la Figura 89. Debido a la configuración de la tubería de dosificación y el punto de ingreso del coagulante la distribución del químico no es uniforme concentrándose en la parte central, lo cual puede afectar la eficiencia del tratamiento. La OS 020 y CEPIS consideran que, para el uso de difusores en canales de relativa profundidad, éstos deben diseñarse de tal manera que el coagulante se distribuya en toda la sección de flujo.

Figura 89.

Tubería de dosificación



- Después del punto de mezcla existe una pequeña barrera que genera un salto hidráulico

adicional que afecta a la formación de los flocs como se muestra en la Figura 90. La OS 020 indica que la estructura de interconexión entre la mezcla rápida y el floculador no debe producir un gradiente de velocidad mayor de 100 s^{-1} ni menor que el del primer tramo del floculador, sin embargo, con el resalto adicional que presenta esta unidad no se estaría cumpliendo.

Figura 90.

Resalto hidráulico adicional



- Turbulencia adicional ubicado al final del canal de mezcla rápida e ingreso a los floculadores y puede afectar la eficiencia del tratamiento ya que afecta la formación de flóculos como se muestra en la Figura 91. La OS 020 también menciona que deben empalmarse correctamente las líneas de flujo entre la unidad de mezcla y el floculador (aplicar la ecuación de Bernoulli) para evitar represar el resalto en el mezclador o producir una caída brusca del nivel de agua en el floculador.

Figura 91.

Turbulencia al final del canal de mezcla rápida e ingreso al floculador



La planta cuenta con 1 dosificador en operación, el cual opera por gravedad. El tanque de preparación de solución en operación presenta un Volumen útil de 1m³. El operador gradúa el caudal del coagulante a aplicar, la graduación se realiza en forma manual mediante la apertura o cierre de una válvula como se muestra en la Figura 92.

Figura 92.

Dosificador de coagulante



Nota: Izquierda. Válvula de regulación de caudal para dosificación, derecha probeta utilizada para la regulación de caudal de dosificación.

- La desventaja de utilizar actualmente 01 tanque de preparación de coagulante, es la existencia de periodos de parada de dosificación, pues no se puede dosificar en el momento que se acabó la solución preparada y se requiere preparar más. Adicionalmente el volumen de 1m^3 del tanque en operación genera pocas horas de operación, siendo necesario la preparación frecuente del coagulante.

4.19.1.2. Propuestas de corrección de la unidad de mezcla rápida

- Para el replanteo del diseño de la unidad se está considerando el caudal calculado con la población total (68.39 L/s). La altura del agua en el vertedero que se forma en la coronación de la rampa es 0.139 m, altura de la rampa 0.45 m y la profundidad de agua después del resalto 0.254 m. Los cálculos se muestran en la Tabla 97 y en la Figura 93 se aprecia .

- Es necesario reubicar el difusor a la altura de la zona de turbulencia producida por el resalto hidráulico para favorecer el proceso de formación de los flocs.
- Instalar un tubo difusor de PVC NTP 399.166 Clase 10 de 1 ½" de diámetro con 10 orificios de 3/8" espaciados a 0.07 m centro a centro para aplicar la solución de sulfato de aluminio. Las hojas de cálculo se muestran en la Tabla 99.
- Quitar la grada que se encuentra después del resalto hidráulico para evitar saltos hidráulicos adicionales que interfieran con el proceso de formación de flocs.

Tabla 97.

Resultado de los cálculos dell dimensionamiento del mezclador con cambio de pendiente

Mezcla rápida: Dimensionamiento del mezclador con cambio de pendiente							
Paso	Datos			Und	Resultados		Und
1	Caudal de diseño	Q	68.39	L/s	Caudal unitario	0.095	m ³ /s /m
	Ancho del canal	B	0.068	m ³ /s			
2	Longitud del plano	X	0.72	m	Angulo de inclinación de la rampa	0.37	Radianes
	Altura de la rampa	Eo	1.17	m			
3	Número de Froude (Asumido)	F	5.70	cte	Factor de resolución de la ecuación (K)	21.04	Grados sexagesimales
					Factor de resolución de la ecuación (Φ)	5.40	-
4					Relación de alturas antes y después del resalto	1.21	Radianes
5					Altura antes del resalto	8.33	-
6	Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²	Profundidad antes del resalto	0.030	m
7					Velocidad antes del resalto	0.033	m
8					Número de Froude	2.91	m
10					comprobación: ¿Es estable 4?5 - 9?	5.14	cte
11					Profundidad después del resalto	0.254	m
12					Longitud del resalto	1.327	m
13					Pérdida de carga	0.326	m

Mezcla rápida: Dimensionamiento del mezclador con cambio de pendiente						
Paso	Datos			Und	Resultados	Und
14					Volumen del resalto	0.14 m ³
15	Factor para T = 20°C	$(X/\mu)^{0.5}$	3114.64	-	Gradiente de velocidad: ¿Entre 700 y 1300?	1258 S ⁻¹
					Tiempo de mezcla	2.00 seg
16					Grada al final del resalto	0.042 m
					Altura de agua en el vertedero	0.139 m
17	Longitud canal de ingreso	Li	0.9	m	Velocidad de ascensional en el canal de ingreso	0.106 m/s
18					Velocidad de ingreso tubería	1.200 m/s
					Diámetro de ingreso	269.38 mm
19					Diámetro Nominal Comercial (DN)	200 mm
					Diámetro comercial interno	190.20 mm

Tabla 98.

Constantes de verificación del diseño

Verificación	Valor	Estado
Fc	5.1	OK
G	1258	OK
T	2.00	OK
Eo + h3	0.589	
hp + h2	0.580	OK
Diferencia en mm	9	

En la Tabla 98 se muestra los cálculos de verificación de un correcto dimensionamiento señalados por la OS 020 y CEPIS donde se cumple con lo siguiente:

- Según la OS 020 y CEPIS un correcto dimensionamiento de la mezcla rápida el número de fraude asumido y comprobado tiene que estar entre 4.5 y 9, en los cálculos asumimos 5.70, el número de froude comprobado de 5.14; ambos se encuentran dentro del rango.

- También recomiendan que es necesario verificar la gradiente de velocidad el cual deberá de estar comprendido entre 700 y 1300 S⁻¹, con los cálculos realizados alcanzamos 1258 S⁻¹ valor considerado dentro de lo recomendable.
- Y que el tiempo de mezcla deberá de estar comprendido entre 1 y 7 segundos nuestros cálculos determinaron un tiempo de 2 segundos valor dentro del rango.
- La velocidad ascensional en el canal de ingreso deberá de ser menor a 1 m/s en los cálculos realizados alcanzamos una velocidad ascensional de 0.106 m/s.
- La relación de Eo + h3 entre hp + h2 no debería de ser mayor a 20.

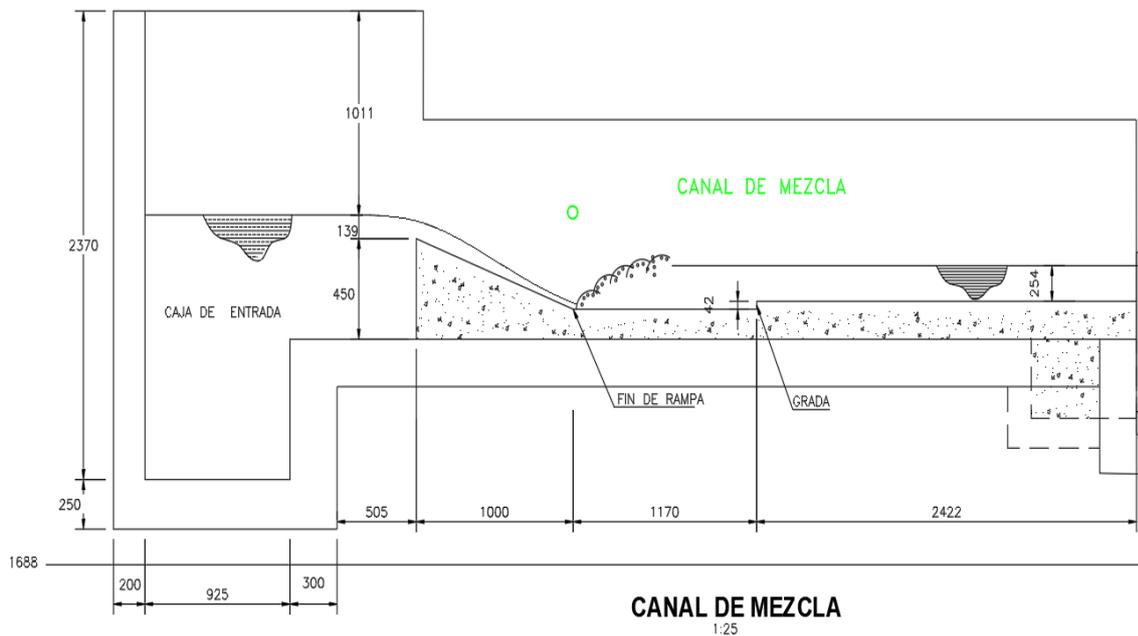
Tabla 99.

Resultados del diseño del tubo difusor de sulfato de aluminio

Mezcla rápida: diseño tubo difusor de sulfato de aluminio							
Paso	Datos		Und	Resultados		Und	
1	Espacio entre orificios	e	0.07	m	Número de orificios en el difusor	10	und
2	Diámetro de los orificios	do	1/2 0.013	pulg m	Sección de los orificios	0.0001	m ²
3	Dosis óptima promedio	D	55	mg/L	Caudal promedio de solución por aplicar	0.150	L/s
4	Concentración del sulfato de aluminio en un el punto de aplicación	C	2.5 25000	% mg/L			
5					Velocidad en los orificios	0.115	m/s
6	Condición para distribución uniforme	R	0.45	-	Velocidad en la tubería	0.052	m/s
7					Sección del difusor	0.00290	m ²
8					Diámetro del difusor	60.72	mm
					Diámetro comercial del difusor	66.00	mm
9	Area corregida del difusor	At'	0.003421194	m2	Diámetro Nominal del difusor (DN)	2 1/2	plug
					Velocidad corregida en el difusor	0.044	m/s
10					Condición para distribución uniforme	0.38	-

Figura 93.

Vista de corte del replanteo del canal de mezcla rápida



4.19.2. Unidades de floculación

4.19.2.1. Observaciones de la unidad de floculadores

El tirante de agua de los floculadores se encuentra con 85 cm, sin embargo, según su diseño el tirante que le corresponde es de 75 cm, esto es debido a que adaptaron tubos en la zona de decantación para incrementar el tiempo de sedimentación. En el diseño de la planta se consideró los siguientes parámetros de operación. En la Tabla 100 se muestran los parámetros operacionales de los tres tramos de los floculadores y en la Figura 94 se muestra el estado actual de las unidades.

Tabla 100.

Parámetros de operación de los floculadores verificados en campo

Tramo	Ancho de tramo	Profundidad útil	N° compartimiento s	Ancho en las vueltas	Q=57 L/s	
					G (S ⁻¹) ₁	T (min)
1	6	0.65	16	0.413	48	6.5

2	6	0.725	14	0.525	26	9.5
3	6.87	0.725	9	0.81	10	7
Totales:						23

La OS 020 y CEPIS mencionan que los parámetros óptimos de diseño de la unidad, gradiente de velocidad (G) y tiempo de retención (T) deberán seleccionarse mediante simulaciones del proceso en el equipo de prueba de jarras. Según las pruebas de tratabilidad en laboratorio los parámetros hidráulicos (tiempo y gradiente) mencionados no son los óptimos para permitir la correcta formación de flocs.

Figura 94.

Estado actual de la unidad de floculadores



Figura 95.

Esquinas en las pantallas que generan turbulencia en el recorrido del agua



En la vista fotográfica de la Figura 94 se observa la unidad de floculadores con un nivel de turbidez muy elevado y en la figura 95 se observa que las pantallas presentan esquinas que generan pequeños remolinos turbulentos que rompen los flocs formados o en formación.

4.19.2.2. Propuestas de corrección de la unidad de floculadores

En el replanteo del diseño aplicando las gradientes óptimas de floculación determinados con las pruebas de tratabilidad en laboratorio se obtienen los siguientes parámetros de operación mostrados en la Tabla 101 y en la Figura 96 se muestra el plano del rediseño de la unidad. La OS 020 Y CEPIS menciona que los gradientes de velocidad deberán disponerse en sentido decreciente, para acompañar el crecimiento y formación del floculo, en el diseño se consideró las tres gradientes óptimas determinadas en las pruebas de tratabilidad.

Tabla 101.

Resultado de las correcciones propuestas para la unidad de floculadores

Tramo	Ancho de tramo	Profundidad útil	N° compartimientos	Ancho en las vueltas	Q=68.39 L/s G (S ⁻¹)	T (min)
1	6.65	0.74	19	0.65	39.4	10
2	6.65	0.74	16	0.77	29.5	10
3	6.79	0.74	12	0.99	19.7	10
Totales:						30

4.19.2.3. Cálculos para el diseño de los tres compartimientos de las unidades de floculación

- Con los resultados de laboratorio para el tramo N°1 se determinó que la gradiente óptima es de 40 S⁻¹ por lo que el diseño es el adecuado para lograr se alcanzó los tiempos y gradientes óptimos como recomienda el CEPIS y la OS 020, logrando una gradiente de velocidad de 39.4 S⁻¹ con una velocidad de 0.22 m/s y tiempo de floculación de 10 minutos. Como se observa en la Tabla 102.
- Los resultados de laboratorio para el tramo N° 2 se determinó que la gradiente óptima es de 30 S⁻¹ Por lo que el diseño se alcanzó los tiempos y gradientes óptimos como recomienda el CEPIS y la OS 020, logrando una gradiente de

velocidad de 29.5 S^{-1} con una velocidad de 0.18 m/s y tiempo de floculación de 10 minutos. Como se observa en la Tabla 103.

- Los resultados de laboratorio para el tramo N° 3 se determinó que la gradiente optima es de 20 S^{-1} Por lo que el diseño tubo que alcanzar la gradiente requerida, logrando una gradiente de velocidad de 19.7 S^{-1} con una velocidad de 0.14 m/s . Como se observa en la Tabla 104.

Tabla 102.

Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 1 del floculador

Compartimiento N.º 1							
Ítem	Datos		Und		Resultados		Und
1	Caudal de diseño	Q	68.39	l/s	Longitud de canales del tramo 1	129.00	m
			0.0683	m ³ /s			
	Tiempo de retención en el tramo 1	T1	10.00	min.			
2	Velocidad en el tramo 1	V1	0.22	m	Selección de canales del tramo 1	0.32	m ³
3	Altura de agua en la unidad	H	0.74	m	Ancho de canales del tramo 1	0.432	m
					Ancho de vueltas del tramo 1	0.65	m
4	Ancho útil de la lamina	b	6.000	m	Ancho del floculador	6.65	m
					Número de canales en el tramo 1	19	unidades
5	Espesor de las láminas	e	0.09	m	Longitud total del tramo 1	9.84	m
6	Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas	k	2	und	Pérdida de carga en las vueltas del tramo 1	0.085	m
7	Gravedad	g	9.8	m/s ²	Perímetro mojado de las secciones del tramo 1	1.91	m
8	Coefficiente de rugosidad	n	0.013	und	Pérdida de carga en los canales del tramo 1	0.011	m
					Radio Hidráulico del canal	0.166	m
					Pérdida de carga total en el tramo 1	0.096	m
9	Factor para T=20 °C	$(\chi/\mu)^{0.5}$	3114.6	4	Gradiente de velocidad en el tramo 1	39.4	32 RPM

Tabla 103.

Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 2 del floculador

Compartimiento N°. 2							
Ítem	Datos		Und	Resultados	Und		
1	Caudal de diseño	Q	68.39	l/s	Longitud de canales del tramo 2	107.40	m
	Tiempo de retención en el tramo 2	T2	0.06839	m ³ /s			
2	Velocidad en el tramo 2	V2	0.18	m	Sección de canales del tramo 2	0.38	m ³
	Altura de agua en la unidad	H	0.74	m	Ancho de canales del tramo 2	0.514	m
3	Ancho útil de la lamina	b	5.88	m	Ancho de vueltas del tramo 2	0.77	m
					Ancho del floculador	6.65	m
4	Espesor de las láminas	e	0.09	m	Número de canales en el tramo 2	16	unidades
					Longitud total del tramo 2	9.57	m
5	Coeficiente de pérdida de carga en las vueltas	k	2	und	Perdida de carga en las vueltas del tramo 2	0.049	m
6	Gravedad	g	9.8	m/s ³	Perímetro mojado de las secciones del tramo 2	1.99	m
					Perdida de carga en los canales del tramo 2	0.005	m
7	Coeficiente de rugosidad	n	0.013	und	Radio Hidráulico del canal	0.192	m
					Perdida de carga total en el tramo 2	0.054	m
8	Factor para T=20 °C	$(\chi/\mu)^{0.5}$	3114.64		Gradiente de velocidad en el tramo 2	29.5	28 RPM

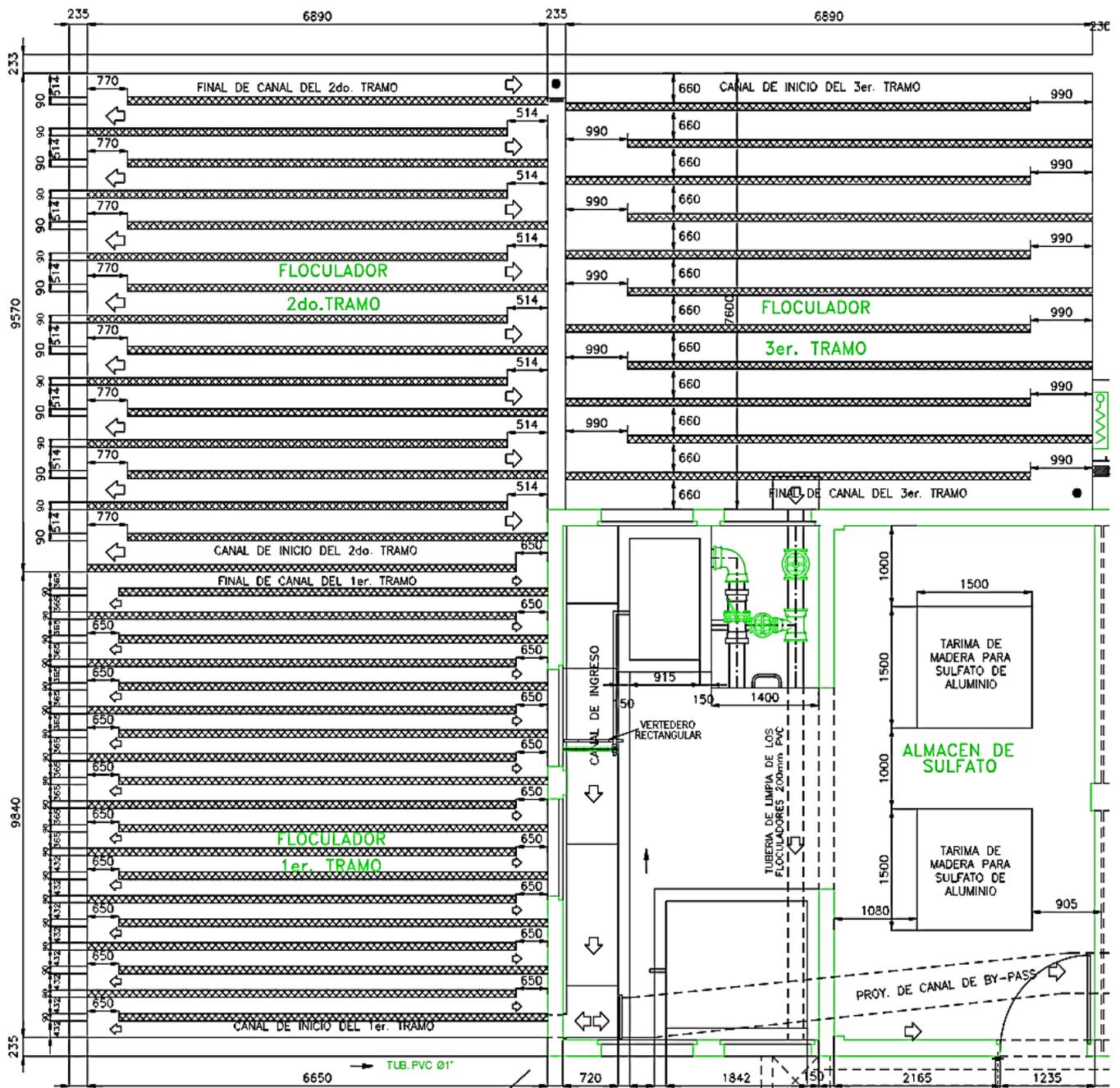
Tabla 104.

Resultados de los cálculos para el dimensionamiento del tramo 3 del floculador

Compartimiento N.º 3							
Ítem	Datos	Und			Resultados	Und	
1	Caudal de diseño	Q	68.39	l/s	Longitud de canales del tramo 3	84.00	m
	Tiempo de retención en el tramo 3	T3	10.00	min.			
2	Velocidad en el tramo 3	V3	0.14	m	Sección de canales del tramo 3	0.49	m ²
	3	Altura de agua en la unidad	H	0.74	m	Ancho de canales del tramo 3	0.66
Ancho de vueltas del tramo 3						0.99	m
4	Ancho útil de la lamina	b	5.8	m	Ancho del floculador	6.79	m
					Número de canales en el tramo 3	12	unidades
5	Espesor de las láminas	e	0.09	m	Longitud total del tramo 3	8.9	m
6	Coeficiente de pérdida de carga en las vueltas	k	2	und	Perdida de carga en las vueltas del tramo 3	0.022	m
7	Gravedad	g	9.8	m/s ³	Perímetro mojado de las secciones del tramo 3	2.14	m
					Perdida de carga en los canales del tramo 3	0.002	m
8	Coeficiente de rugosidad	n	0.013	und	Radio Hidráulico del canal	0.228	m
					Perdida de carga total en el tramo 3	0.024	m
9	Factor para T=20 °C	(X/μ) ^{0.5}	3114.64		Gradiente de velocidad en el tramo 3	19.7	20RPM

Figura 96.

Vista de planta de replanteo de los tres tramos de floculación



4.19.3. Unidades de decantación

4.19.3.1. Observaciones de las unidades de decantación

Figura 97.

Estado de los decantadores con turbidez elevada

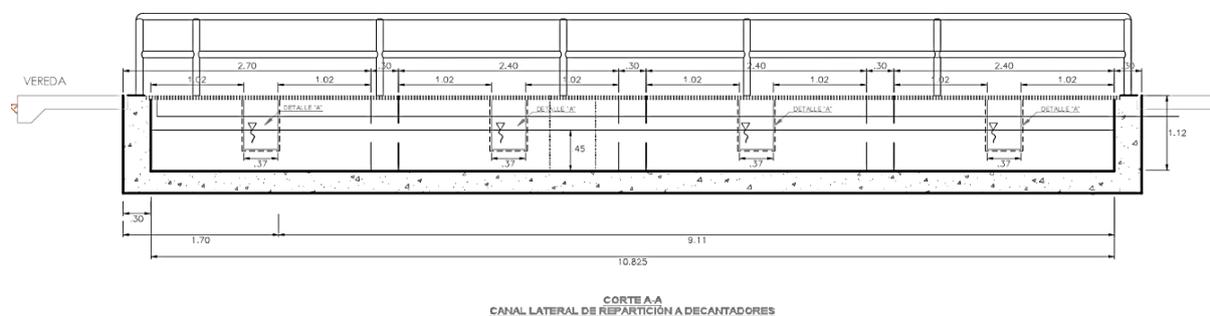


En la Figura 97 se muestra las unidades de decantación tratando un agua con alto contenido de turbidez, en la imagen se puede visualizar la deficiencia que presenta la unidad para tratar agua de esa calidad.

a. Canal de recolección de agua floculada. La recolección de agua floculada para la distribución en los decantadores se realiza mediante un canal de sección constante, el cual no aseguraría una distribución homogénea del caudal a los 4 decantadores. De acuerdo a lo manifestado por el operador quien realizo pruebas de trazadores la distribución del caudal no es uniforme ya que se sobrecarga a los decantadores 3 y 4. El diseño actual del canal se muestra en el plano mostrado en la Figura 98. CEPIS y la OS 020 considera que los conductos o canales de agua floculada deben asegurar una distribución uniforme del flujo a los diversos decantadores sin cortocircuitos hidráulicos y que en una estructura de distribución se aceptará como máximo una desviación de 5% en el reparto de caudales.

Figura 98.

Vista de corte del canal de recolección de agua floculada



b. Tubería de distribución de agua floculada. La cantidad de orificios en los decantadores no son suficientes para la distribución uniforme de agua floculada en cada decantador. Con la visita a planta se observó que el diámetro de los orificios no es igual. CEPIS y la OS 020 mencionan que la tubería difusora deberá tener el mayor número posible de orificios uniformemente espaciados en todo el ancho y la altura útil del decantador; la distancia entre orificios debe ser igual o inferior de 0,50 m y de preferencia deben tener forma circular y aboquillados como se muestra en la Tabla 105.

Tabla 105.

Tubería de distribución de agua floculada

Tubería de PVC Clase 10 de 500 mm	2und/decantador
Longitud de tubería	3.86 m
Numero de orificios	9
Diámetro de cada orificio	80 - 90 mm
Espaciamiento entre orificios	40 cm

c. Zona de decantación. Se cuenta con 04 unidades de decantación de flujo laminar. Cada unidad presenta 01 módulo de dimensiones de 2.45 x 3.86 m. Las placas son de vinilona y están instaladas a una distancia horizontal de 12cm.

El dimensionamiento se realizó con una tasa de decantación de $28.2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$, sin embargo, la tasa de decantación real determinada en las pruebas de tratabilidad es de $30.8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$, dicho dato influyen en la velocidad media, número de Reynolds y la velocidad longitudinal máxima.

d. Sistema de recolección de agua decantada. La recolección se realiza mediante tuberías perforadas de PVC. La distancia vertical de las vinilonas al lomo de la tubería de recolección es 0.93m.

En la planta adecuaron tubos de 25cm de alto en los orificios de las tuberías de recolección para incrementar la altura de recolección y favorecer el tiempo de sedimentación, sin embargo, las tuberías provisionales no son fijas tienden a caerse por lo que es necesario rediseñar la unidad.

El CEPIS establece que el nivel de agua por encima de la tubería de recolección debe ser de 5 a 10 cm, sin embargo, la carga de agua se encuentra hasta los 25 cm, como se muestra en la Figura 99.

Figura 99.

Decantador de flujo laminar.



Nota: La vista fotográfica izquierda muestra los tubos de 25cm de alto colocados en los orificios de las tuberías de recolección, al lado derecho se observa las tuberías de recolección de agua decantada sin los tubos de PVC en los orificios.

e. **Zona de recolección de lodos.** La sección del canal recolector de lodos no favorece a la decantación de los flóculos por el diseño que presenta. La tolva de lodos actual de la planta no presenta una pendiente uniforme como se aprecia en la vista de corte de la figura 100, esto dificulta el desplazamiento vertical de los flocs hacia la zona de recolección de lodos.

Figura 100.

Vista de corte de los decantadores



La tolva presenta una capacidad de 12.96 m³. De acuerdo a lo que manifiesta el operador, la limpieza de los decantadores se realiza cada 4 días.

4.19.3.2. Propuestas de corrección de la unidad de decantadores

Para homogenizar la distribución del caudal en los 4 decantadores, fue necesario rediseñar el canal lateral de distribución de agua floculada. Obteniendo los siguientes resultados:

4.19.3.3. Cálculos para el dimensionamiento del canal lateral de agua

Tabla 106.

Resultados del dimensionamiento del canal lateral de agua

Decantador laminar: dimensionamiento del canal lateral de agua							
Paso	Datos			Und	Resultados		Und
1	Caudal	Q	0.0684	m ³ /s	Caudal ingreso a cada decantador	0.01709	m ³ /s
2	Nº de Decantadores	N	4	cte.			

3	Ancho del Canal	B	0.58	m	Sección final del canal	0.35	m ²
4	Altura Mínima	Hf	0.60	m			
5	Velocidad en la Sección Inicial	Vi	0.1100	m/s	Velocidad en sección final del canal	0.05	m/s
6					Sección inicial del canal	0.62	m ²
7	Velocidades en los Laterales	VL	0.222	m/s	Altura inicial del canal	1.07	m
					Sección útil de las compuertas	0.08	m ²
8	Ancho de las compuertas	b	0.37	m	Altura de las compuertas	0.21	m
					Coeficientes Experimentales de Hudson	∅	1.67
9	De la Tabla 1	$\sum(1/\beta^{0.5})$	2.866		Velocidad real en la primera compuerta	0.213	m/s
10	De La Tabla 1	β_n	1.905		Velocidad real en última compuerta	0.224	m/s
11					Desviación de caudal - ¿Aceptable?	4.98	%
					Pérdida de carga en las compuertas	0.0049	m
12	Ancho de sección - compuerta Tirante de sección - compuerta	b	0.37	m	Radio hidráulico de una compuerta	0.098	m
13	T = 20°C	$(\bar{X}/\mu)^{0.5}$	3114.6	cte.	Gradiente de velocidad al paso del flujo por compuertas (G)	16.86	s ⁻¹
		coef. Darcy (f)	0.020	cte.			
		R _H	0.0984	m			
		g	9.810	m/s ²			

Decantador laminar: comprobación de la desviación de la velocidad en el canal lateral de agua

Velocidad en los laterales (VL)	0.22	Altura inicial (Hi)	1.07	Diseño (m ³ /s)	0.068
Ancho (B)	0.58	Altura final	0.60	q (m ³ /s)	0.0171

Ancho Comp (b)	0.37	ΔH	0.47	Ancho por módulo decantador	2.45	Anchos muros del decantador	0.3
Altura Comp (h)	0.21	Pendiente (m) = $\Delta H/\Delta X$	0.0433			Ancho canal central	0.58
# Decantadores = # compuertas	4			X (i=1)	3.63	Ancho muros de canal central	0.15

Tabla 107.*Resultados del caudal de paso para cada compuerta del decantador*

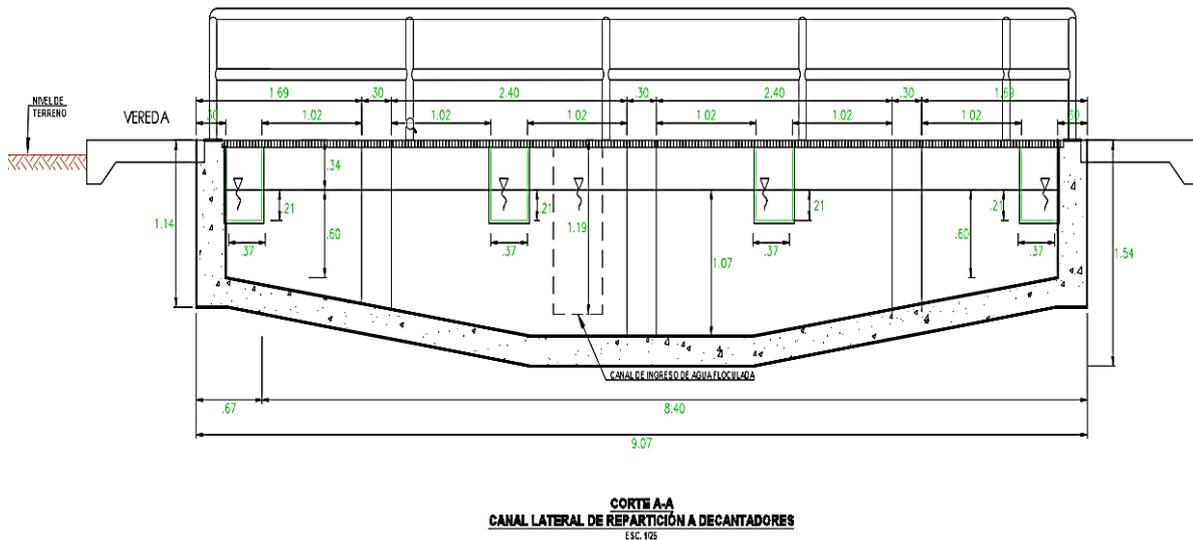
N.º de compuertas	Q (m ³ /s)	X (m)	Ha (m)	Ax (m ²)	Vc (m/s)	Vc/VL	β	$\beta^{0.5}$	(1/ $\beta^{0.5}$)	VL (m/s)
1	0.0684	0.00	1.07	0.62	0.110	0.495	2.110	1.453	0.688	0.211
2	0.0513	3.63	0.91	0.53	0.097	0.435	2.017	1.420	0.704	0.216
3	0.0342	7.26	0.76	0.44	0.078	0.351	1.905	1.380	0.724	0.222
4	0.0171	10.89	0.60	0.35	0.049	0.221	1.782	1.335	0.749	0.230
								SUMA	2.866	

Los cálculos de la unidad se muestran en la Tabla 107, los cuales indican un correcto dimensionamiento según lo recomendado como se menciona a continuación:

- Según el CEPIS, un correcto diseño de planta presenta una desviación de caudal en las compuertas menor a 5%, en los cálculos desarrollados alcanzamos una desviación de 4.98 % por lo que el diseño es aceptable.
- Otro criterio que considera el CEPIS a considerar es la gradiente de velocidad al paso del flujo por las compuertas el cual deberá estar comprendido entre 15-20 S⁻¹ con los cálculos realizados alcanzamos una gradiente de 16.86 S⁻¹
- La vista de corte que muestra las medidas obtenidas con los cálculos realizados se muestra en la Figura 101.

Figura 101.

Vista de corte del canal de repartición de agua a los decantadores



4.19.3.4. Cálculos para el diseño de la tubería de distribución de agua floculada en el decantador. Para mejorar la distribución del caudal es necesario incrementar el número de orificios, reduciendo el espaciamiento entre orificios con un diámetro constante de 80 mm en todos los orificios. En la Tabla 108 se presenta una comparación entre la tubería de distribución existente y el replanteo obtenido con los cálculos mostrados en las Tablas siguientes:

Tabla 108.

Comparación entre las tuberías de distribución de agua floculada existente y la que se está proponiendo en el replanteo.

	Existente	Replanteo
Tubería de PVC Clase 10 de 500 mm	2und/decantador	2und/decantador
Longitud de tubería	3.86 m	3.86 m
Número de orificios	9	13
Diámetro de cada orificio	80 - 90 mm	80 mm
Espaciamiento entre orificios	40 cm	30 cm

Tabla 109.

Resultados del dimensionamiento de la tubería de distribución de agua floculada en el decantador.

Decantador laminar: tubería de distribución de agua floculada en el decantador							
Paso	Datos		Und		Resultados	Und	
1	Caudal de un decantador en condiciones mantenimiento de una unidad	q	0.017090	m ³ /s	Caudal en cada canal / tuberías	0.00855	m ³ /s
	Número de hileras de orificios x canal central	n	1		Caudal por hilera de orificios	0.00855	m ³ /s
2	Velocidad en los orificios	VL	0.130	m/s	Área total de orificios por hilera	0.0657	m ²
3	Separación centro a centro entre orificio	a	0.30	m	Número de orificios por hilera de cada lado del canal	13	Und
	Distancia entre la pared y el primer orificio	D	0.20	m			
4	Longitud del canal.	L	3.9	m	Área de cada orificio.	0.0051	m ²
	Número canales / tuberías x decantador	m	2	m			
5					Diámetro de los orificios	80.2356	mm
					Diámetro comercial nominal (DN)	90	mm
					Diámetro comercial del orificio	86.20	mm
6	Ancho de la mitad del canal central	B	0.500	m	Sección en el extremo final del canal	0.178	m ²
	Altura mínima	h	0.475	m			
7					Caudal por orificio.	0.00066	m ³ /s
					Caudal que llega al extremo final del canal	0.0007	m ³ /s
					Velocidad en el extremo final del canal	0.0037	m/s
8	Altura máxima del canal	H	0.475	m	Sección inicial del canal.	0.2375	m ²
9					Velocidad en el extremo inicial.	0.0360	m/s
10	Coefficientes experimentales	Θ	0.70	cte.	Coefficiente pérdida de	1.828	cte.

Decantador laminar: tubería de distribución de agua floculada en el decantador							
					carga total en el primer orificio del canal		
		\emptyset	1.67	cte.	Coficiente de pérdida de carga en el último orificio del canal	1.701	cte.
					Velocidad real en el primer orificio	0.1101	m/s
					Velocidad real en el último orificio	0.1142	m/s
11	De la Tabla 2	$\Sigma(1/\beta^{0.5})$	9.836	cte.	Desviación de caudal entre el primer y el último orificio	3.54	%
					- ¿Aceptable?		
12					Pérdida de carga en las compuertas	0.00113	m
		$(X/\mu)^{0.5}$	3114.64	cte.	Radio hidráulico de una compuerta	0.0216	
13	T = 20°C				Gradiente de velocidad en los orificios	13.75	s-1
		f	0.015	cte.			
		R _H	0.0216	m			
		g	9.810	m/s ²			

Decantador laminar: comprobación de la desviación del caudal en el canal de distribución de agua

VL=	0.13	H inicial=	0.48	Long. Útil Decantador=	3.5	Diseño=	0.0085			
Ancho canal=	0.50	h final =	0.48	Q de c/orificio=	0.00066	Dist entre orificios=	0.300			
						Área orificio=	0.006			
N.º de Orificios	Q (m³/s)	X (m)	Hx (m)	Ax (m²)	Vc (m/s)	Vc/V _L	β	$\beta^{0.5}$	$(1/\beta^{0.5})$	VL (m/s)
1	0.00		0.4							0.11
	85	0.00	8	0.238	0.036	0.28	1.828	1.352	0.740	01
2	0.00		0.4							0.11
	79	0.30	8	0.238	0.033	0.26	1.809	1.345	0.744	07
3	0.00		0.4							0.11
	72	0.60	8	0.238	0.030	0.23	1.792	1.338	0.747	12
4	0.00		0.4							0.11
	66	0.90	8	0.238	0.028	0.21	1.776	1.333	0.750	17
5	0.00		0.4							0.11
	59	1.20	8	0.238	0.025	0.19	1.761	1.327	0.754	22
6	0.00		0.4							0.11
	53	1.50	8	0.238	0.022	0.17	1.748	1.322	0.756	26
7	0.00		0.4							0.11
	46	1.80	8	0.238	0.019	0.15	1.737	1.318	0.759	30
8	0.00		0.4							0.11
	39	2.10	8	0.238	0.017	0.13	1.727	1.314	0.761	33
9	0.00		0.4							0.11
	33	2.40	8	0.238	0.014	0.11	1.719	1.311	0.763	35
10	0.00		0.4							0.11
	26	2.70	8	0.238	0.011	0.09	1.712	1.308	0.764	38

Decantador laminar: tubería de distribución de agua floculada en el decantador										
	0.00		0.4							0.11
11	20	3.00	8	0.238	0.008	0.06	1.707	1.306	0.765	39
	0.00		0.4							0.11
12	13	3.30	8	0.238	0.006	0.04	1.703	1.305	0.766	41
	0.00		0.4							0.11
13	07	3.60	8	0.238	0.003	0.02	1.701	1.304	0.767	42
								SUMA	9.836	

En la tabla 109 se muestran todos los cálculos realizados para el dimensionamiento la tubería de distribución de agua floculada al decantador donde se cumplen con los criterios de diseño como se menciona a continuación

- El CEPIS recomienda que la desviación del caudal entre el primer y el último orificio deberá ser menor de 5 % con los cálculos realizados alcanzamos una desviación de 3.54 %.
- También considera que la gradiente de velocidad en los orificios deberá de estar comprendida entre 10 y 15 S⁻¹, la gradiente obtenida con los cálculos es de 13.75 S⁻¹ dentro del rango.

4.19.3.5. Cálculos de zona de sedimentación de agua del decantador

laminar

- En el replanteo también se consideró 04 unidades de decantación de flujo laminar. Cada unidad presenta 01 módulo de dimensiones de 2.45 x 3.86 m, las placas son de vinilona, instaladas a una distancia horizontal de 12cm.

El correcto dimensionamiento de acuerdo al caudal y a los criterios diseño se muestran en la Tabla 110.

Tabla 110.

Resultados de dimensionamiento de la zona de sedimentación de agua del decantador laminar

Decantador laminar: zona de sedimentación de agua del decantador laminar

Paso	Datos	Und.	Resultados	Unid.			
1	Separación de las placas en el plano horizontal	e'	12	cm	Espaciamiento perpendicular entre las placas	10.335	cm
	Espesor de las lonas	e	0.057	cm			
	Angulo de inclinación de las placas	θ	60	°			
2	Longitud del módulo de placas (comercial $l=1.2$ m)	l	1.20	m	Longitud útil dentro de las placas	114.0	cm
					Longitud relativa del módulo de placas	11.03	m
3	Módulo de eficiencia de las placas	s	1.00	cte.	Coeficiente del Módulo de Placas	5.53	cte.
4	Velocidad de sedimentación de las partículas (laboratorio)	V_s	0.00035648	m/s			
5	Tasa de decantación real	q_r	30.80	$m^3/m^2/d$			
6	Caudal de diseño por decantador	Q	0.017	m^3/s	Área superficial de la unidad	8.68	m^2
7	Ancho total neto de la zona de decantación	B	2.45	m	Número de canales formados por las placas	30.0	
8					Longitud total del decantador	4.20	m
9					Velocidad media del flujo	0.227	cm/s
10	Ancho del módulo de placas	$b = B$	2.45	m	Radio hidráulico del módulo de placas	4.96	cm
11	Viscosidad a $T^o = 23$ °C	ν	0.010040	cm^2/s	Número de Reynolds	449.37	
12					Velocidad Longitudinal máxima - ¿Mayor a V_o ?	0.267	cm/s
						Ok	

- Las únicas diferencias del diseño actual son básicamente por la tasa de decantación real determinada en laboratorio de 30.8 $m^3/m^2 \times d$, dicho dato influyen en la velocidad media, número de Reynolds y la velocidad longitudinal máxima. Los criterios se muestran en la Tabla 111.

Tabla 111.

Comparación de los criterios de diseño considerados en el diseño existente y el replanteo de la unidad

	Criterio para diseño existente	Criterio para replanteo
Tasa de decantación real	28.2 m ³ /m ² /día	30.8 m ³ /m ² /día
Velocidad media del flujo cm/s	0.208	0.227
Numero de Reynolds	411.09	448.99
Velocidad longitudinal máxima cm/s	0.234	0.267

- Las velocidades y el número de Reynolds se encuentran dentro del rango recomendado por el CEPIS.
- La velocidad media del flujo deberá de estar comprendida entre 0.16 y 0.42 cm/s con los cálculos realizados alcanzamos una velocidad media de 0.227 cm/s
- El número de Reynolds para un flujo laminar deberá ser menor a 500, con el cálculo realizado alcanzamos 449.37, dentro de lo recomendado.

4.19.3.6. Cálculo de la tubería de recolección de agua decantada.

CEPIS recomienda que los tubos con perforaciones en la parte superior tienen excelentes resultados cuando los orificios son de igual diámetro con los cálculos realizados se determinó 30 orificios con diámetro de $\frac{3}{4}$ "por cada tubo de recolección.

También recomienda que la carga de agua sobre la tubería de recolección deberá de estar comprendida entre 5 a 10 cm, según nuestros cálculos la carga de agua deberá ser de 5.09 cm. Todos los cálculos realizados se muestran en la Tabla 112.

Tabla 112.

Resultados del dimensionamiento del decantador laminar y zona de recolección de agua del decantador

Decantador laminar: zona de recolección de agua del decantador laminar							
Paso	Datos		Und		Resultados		Und
1	Caudal por decantador	Q	0.017	m ³ /s	Longitud total de tuberías de recolección	7.77	m
2	Tasa de diseño de las tuberías de recolección	qv	2.2000	L/s/m	Numero de tubos por decantador (En cada módulo seria N/2)	2.0	Und
	Ancho total del módulo de placas	B	2.45	m	Valores corregidos	8.40	m
3	Ancho del módulo de placas	b	2.45	m	Número de orificios por tubo en cada modulo	28	Und
	Longitud total del decantador	L	4.20	m	Área del orificio	0.0003	m ²
4	Espaciamientos entre orificios	e	0.15	m	Área útil de la tubería (todos los orificios)	0.05504	m ²
5	Diámetro de los orificios	do	3/4 0.01905	pulg. m	Diámetro tubería	264.7	mm
	Relación para recolección uniforme que asegura una desviación <5%	R	0.145		Diámetro nominal de la tubería (DN)	315	mm
6	0.15 > =n x Ao / At				Diámetro comercial de la tubería	299.6	mm
					Numero de orificios por decantador	56	Und
7	gravedad	g	9.81	m/s ²	Caudal por orificio	0.00031	m ³ /s
					Velocidad por orificio	1.071	m/s
					Altura de agua sobre las tuberías	5.84	cm
8	Verificación	At	0.0705	m ²	< 0.15	0.1132	-

- CEPIS recomienda que la tasa de diseño de las tuberías de recolección deberá estar comprendidas entre 1.1. – 1.3 L/s/m, la tasa empleada para el diseño es de 2.2 dentro de lo recomendado
- También menciona que la altura del agua sobre las tuberías deberá estar entre 5 - 10 cm, la altura alcanzada con los cálculos es de 5.84 cm.

4.19.3.7. **Cálculo de la zona de extracción de lodos.** En el rediseño se consideró modificar la sección del canal recolector tal que favorezca la sedimentación.

- En el replanteo del diseño se determina una pendiente de 60° para facilitar el desplazamiento vertical de los flóculos formados hacia la zona de recolección de lodos, en la Tabla 113 y 114 se determina los cálculos realizados para la unidad y en la Figura 102 se muestra el plano con las dimensiones calculadas.

Tabla 113.*Resultados del dimensionamiento de la zona de extracción de lodo en el decantador laminar.*

Decantador laminar: zona de extracción de lodo del decantador laminar							
Paso	Datos			Unidad	Resultados		Unidad
1	Longitud del decantador	L	4.20	m	Volumen de la tolva	9.15	m ³
2	Número de tolvas por decantador	n	1	constante			
3	Ancho total del decantador	B	3.33		Volumen de lodo producido	7.38	m ³ /día
4	Profundidad de las tolvas	h	1.20	m	Tiempo de retención de la Tolva	1.24	días
5	Ancho de la tolva	a	3.33	m	Numero de orificios en el canal de recolector	11.05	und
6	Tasa de producción de lodos (dato que se obtiene de las pruebas de laboratorio)	ql	0.0050	-	Sección del canal recolector	0.153	m ²
7	Caudal de diseño	Qd	0.01709	m ³ /s	Altura del canal de recolección	0.51	m
8	Ancho canal recolector	b	0.30	m			
9	Diámetro de orificios	d	2	pulg			
10	Espaciamiento horizontal entre orificios	e	0.38	m			
11	Relación para recolección uniforme que asegura una desviación <5% $0.15 > = n \times A_o / A_t$	R	0.146	-			

Tabla 114.*Dimensionamiento vertical del decantador*

Dimensiones Verticales del decantador		Und.
Altura del N máx. Agua a placas	1.00	m
Altura de las placas inclinadas	1.04	m
Altura del fondo de las placas a la tolva	1.20	m
Altura de la placa inclinada a final de tubería	0.65	m
Altura del canal de recolección	0.5	m
Carga hidráulica	3.89	m

Tabla 115.*Resultados del dimensionamiento de la zona de extracción de lodo del decantador laminar*

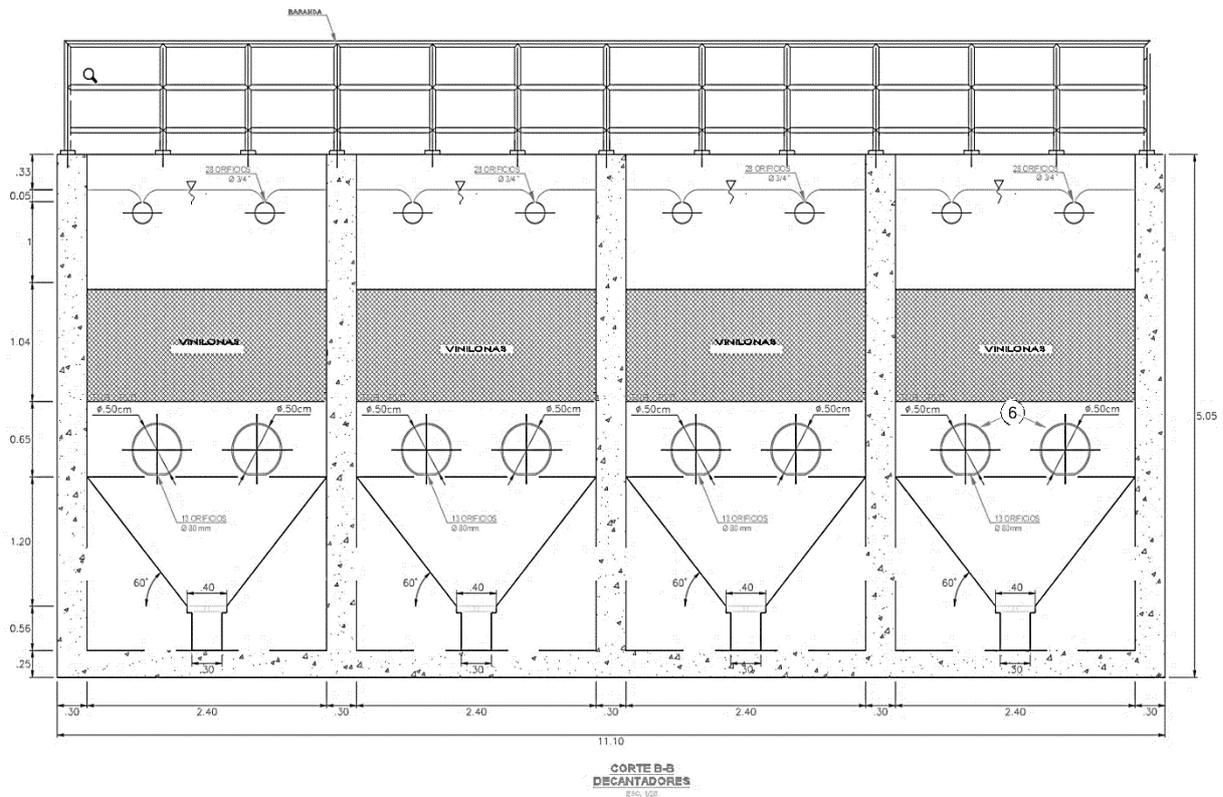
Decantador laminar: zona de extracción de lodo del decantador laminar							
Paso	Datos			Unidad	Resultados		Unidad
1	Longitud del decantador	L	3.86	m	Longitud de la base mayor de cada tolva	0.386	m
2	N° de tolvas por decantador a lo largo	N	10	und			
3	Ancho total del decantador	B	3.75	m	Sección máxima de la tolva	0.95	m ²
	N° de tolvas a lo ancho	N	1.00	und	Angulo del lado 1 de la tolva inclinada	60.00	°

Decantador laminar: zona de extracción de lodo del decantador laminar							
	Ancho de cada módulo del decantador	L1	2.45	m	Angulo del lado 2 de la tolva inclinada	60.00	°
4	Profundidad de la sección recta de la tolva	h1	0.60	m	Volumen de la parte recta de la tolva	5.67	m ³
5	Profundidad del tronco de pirámide de la tolva	h	1.20	m	Volumen del tronco de pirámide de la tolva	3.78	m ³
6	Tasa de producción de lodos (dato que se obtiene de las pruebas de laboratorio)	ql	0.005 0	L * L/s	Caudal de lodos producidos por la unidad en época de lluvias	0.09	L/s
					Frecuencia de descarga	1.28	días
7	Caudal de diseño	Q d	0.017 1	m ³ /s	Diámetro de los orificios de descarga	45.2	mm
					Diámetro Nominal del orificio (DN)	63.0	mm
8	Velocidad de arrastre	Va	3.00	cm/s	Diámetro comercial de los orificios de descarga	59.8	mm
9	Carga hidráulica	H	2.64	m	Diámetro del colector	199.5 5	mm
					Diámetro Nominal del colector (DN)	200	mm
10	Relación de velocidades para una desviación de 10%	R	0.898	-	Diámetro comercial del colector	185.4	mm
11	Numero de módulos	n	1	und	Sección de colector	0.027	m ²
					Caudal de descarga de lodos	0.13	m ³ /s
12	Coeficiente de descarga orificio	m	0.65	-	Volumen de descarga de lodos	9.46	m ³
13	gravedad	g	9.81	m/s ²	Tiempo de descarga	74.95	seg

- CEPIS indica que la profundidad de la tolva deberá de ser minimo 0.6 m, para el diseño se estableció 1.20 m.
- También indica que la relación para recolección uniforme que asegura una desviación <5% deberá ser menor a 0.15, para el diseño se estableció 0.146
- Y que la velocidad de arrastre deberá de estar comprendido entre 1-3 cm/s, para el diseño se estableció 3 cm/s.
- También indica que el ángulo de la tolva inclinada deberá estar comprendida entre 45° y 60°, con los cálculos se obtuvieron 60°

Figura 102.

Vista de corte del replanteo de la zona de recolección de lodos



4.19.4. Unidades de filtración

4.19.4.1. **Observaciones de la unidad de filtros.** Se cuenta con 06 unidades de filtración de tasa declinante y lavado mutuo con lecho doble, los cuales presentan un área total de 27.8 8m², y podrían tratar 90L/s. Referente al lavado de filtros se observó que:

- El lavado se realiza de forma inadecuada, ya que el agua de lavado ahoga la canaleta, produciendo que los sólidos removidos en expansión vuelvan a sedimentar en el lecho filtrante. Como se observa en la Figura 103.
- La expansión del medio filtrante es alta, alcanza el 46%, lo cual podría generar pérdida de material filtrante, CEPIS recomienda que la expansión del medio filtrante debe ser de 20% a 30%.

- Con el caudal de operación (57.7L/s) la velocidad de lavado es de 0.75 m/min encontrándose dentro del rango recomendable de 0.7 a 1.0m/min.

Figura 103.

Retrolavado de filtros



El lavado de filtro que se efectúa es ineficiente, la superficie del filtro posterior al lavado presenta impurezas. Esto no es debido a la falta de expansión, ya que esta es excesiva, se debe al ahogamiento del canal de lavado.

4.19.4.2. Propuestas de corrección de la unidad de filtros

Es necesario cambiar el espesor de los medios filtrantes considerando un espesor 0.3 m de arena y 0.50 m de antracita para alcanzar la expansión recomendable de 30%

Incrementar la altura de la canaleta de lavado para evitar el ahogamiento de la canaleta durante el lavado del medio filtrante y así evitar que los sólidos removidos

vuelvan a sedimentar en el lecho filtrante. Véase la Figura 104 y los cálculos de las Tablas 116 y 117.

4.19.4.3. Cálculo de dimensionamiento de las baterías de filtros

Tabla 116.

Resultados del dimensionamiento de las baterías de filtro

Dimensionamiento de la batería de filtros			
Paso	Datos		Unid
1	CAUDAL	0.068	(m3/s)
2	Velocidad ascensional de. Lavado	0.908	m/min
3	T. fil o Vel. Filtración promedio	218	m3/m2/día
Área y dimensiones del filtro			
4	Área de cada filtro	4.520	m ²
5	Área total de filtros	27.109	m ²
6	Número de filtros	6.0	
7	Ancho del filtro	2.40	m
8	Longitud del filtro	1.88	m
Características del agua			
9	Temperatura (°C)	20	
10	Dens.agua. (gr/cms2)	0.999	
11	Visc.absol (kg/ (s.m))	0.01004	
12	P. Esp.agua (kg/m3)	999.73	
13	Ac. gravedad(m/s2)	9.81	
Características del medio filtrante			
		ARENA	ANTRACITA
15	Espesor de la capa	0.3	0.50
16	Tamaño.efec. D10 (mm)	0.56	0.84
17	D60 (t.60%)	0.84	1.26
18	D90 (t.90%)		1.68
19	Densidad (gr/cm3)	2.65	1.50
20	P. especifico (kg/m3)	2650	1500
21	Porosidad	0.42	0.45
22	Coef. Esfericidad (ce)	0.80	0.70
23	Coef. Uniformidad	1.50	1.50
24	Porosidad	0.42	0.45
25	Tamaño máximo (mm)	1.65	2.38
26	Tamaño mínimo (mm)	0.5	0.83
Cálculo de la expansión de medio filtrante en el lavado			

27	Porosidad expandida arena	0.56	%
28	porosidad expandida antracita	0.58	%
29	% exp. arena	0.308	%
30	% exp. antracita	0.308	%
31	Alt. lecho filtrante expandido	1.047	m
Diseño de canaletas de lavado			
32	N° canaletas	1	
33	Alt. Útil canaleta (m)	0.30	m
34	Caudal que recolecta la canaleta	5.335	m ³ /min
35	Ancho canaleta (m)	0.39	m
36	Alt.total cnlta (m)	0.55	m
37	h4 cnlta filt (m)	1.01	m
38	Alt. Entre lecho (m) expand y fondo cnlta.	0.1	m
39	Alt. Total, desde la superf. Lecho al (m) borde cnlta.	0.54	m
40	Longitud de vigueta	2.44	m
Diseño del falso fondo			
Paso	Datos		Unid
41	Falso fondo(m)	0.50	m
42	Ancho falso fondo (m)	1.88	m
43	sec.trans. F. Fdo (m ²)	0.94	m ²
44	V.retlv f. Fdo (m/s)	0.073	m/s
45	K falso fondo	1	cte.
Diseño del sistema de drenaje			
46	Alt. Drenaje + grava(m)	0.52	m
47	N.º viguetas drenaje	8	
48	N.º orificios por vigueta	38	
49	N.º orificios drenaje	304	
50	Ancho vigueta(m)	0.30	m
51	Distancia orificios (m)	0.10	m
52	Long. Unid y vigueta (m)	1.9	m
53	Diámetro orifico (plg.)	0.75	pulg
54	Cd orificios	0.65	
55	Área orificios drenaje (m ²)	2.85E-04	m ²
56	Q lav. orificio (m ³ /s)	1.78E-04	m ³ /s
Cálculo de la altura de la canaleta de lavado			
57	H. dren+grava(m)	0.52	m
58	H. capa arena(m)	0.30	m
59	H. capa antr. (m)	0.50	m
60	Alt.borde. cnlta fondo (m)	2.72	m
61	Alt.borde. cnlta fondo (m)	2.83	m

62	Alt.borde. cnlta fondo (m)	2.62	m
Cálculo de la pérdida de carga en el retrolavado			
63	Perdida de carga en arena (m)	0.29	m
64	Perd. De carga en antracita. (m)	0.14	m
65	Perd. De carga medio filt. (m)	0.43	m
66	Perd. De carga drenaje. (m)	0.08	m
67	Perd. De carga falso fondo (m)	2.69E-04	m
68	Perd. Carga cpta. Salida (m)	1.15E-01	m
69	Perd. Carga canaleta (m)	5.48E-02	m
70	Perd. Carga total retrolavado (m)	0.67	m
71	Nivel de vertedero de salida de la batería(m)	3.39	m
Diseño de compuertas o válvulas			
Salida			
72	Velocidad comp. salida (m/s)	1.50	m/s
73	K cpta salida	1	cte.
74	Sección cpta. Salida (m2)	0.046	m2
75	Diámetro de válvula tipo (m) mariposa (pulgadas)	9.5	pulg
Entrada			
76	Velocidad comp entrada (m/s)	1.28	m/s
77	K cpta entrada	1	cte.
78	Sección cpta. Entrada (m2)	0.012	m/2
79	Diámetro de válvula tipo (m) mariposa (pulgadas)	4.8	pulg

Tabla 117.

Distribución del medio filtrante en subcapas y cálculo de la expansión

Distribución del medio filtrante en subcapas y cálculo de la expansión								
Di (MIN)	Di (MAX.)	DIAMETRO	# GALILEO	# REYNOLD S	Ei	Xi	Xi/(1-Ei)	Xi/Di2
mm	mm.	EQUIVAL.		MODIFIC.	TANTEOS			

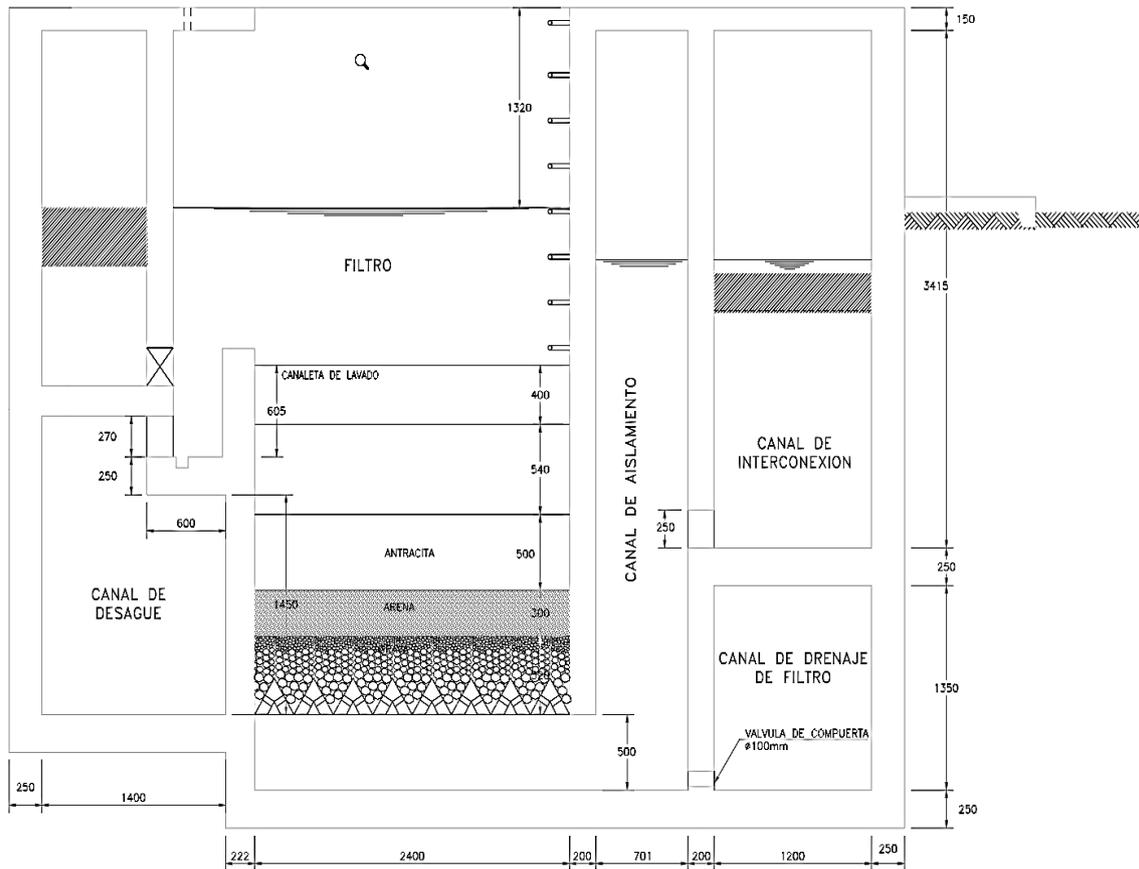
1.41	1.65	1.525	570	1.8	0.35	0.05	0.077	21491.51
1.17	1.41	1.284	340	1.5	0.43	0.07	0.123	42431.96
1	1.17	1.082	203	1.3	0.49	0.11	0.216	94017.09
0.83	1	0.911	121	1.1	0.51	0.20	0.408	240963.86
0.7	0.83	0.762	71	0.9	0.56	0.21	0.482	364888.12
0.59	0.7	0.643	43	0.7	0.60	0.20	0.508	491525.42
0.50	0.59	0.543	26	0.6	0.65	0.16	0.443	525423.73
		0				1.00	2.256	1780741.69
Di (min)	Di (máx.)	Diámetro	#	#	Ei	Xi	Xi/(1-ei)	Xi/di ²
mm	mm	equival.	galileo	reynolds	tanteos			
2	2.38	2.182	505	2.5	0.44	0.03	0.054	6302.52
1.65	2	1.817	292	2.1	0.47	0.08	0.142	22727.27
1.41	1.65	1.525	173	1.8	0.51	0.19	0.388	81667.74
1.17	1.41	1.284	103	1.5	0.56	0.25	0.568	151542.70
1	1.17	1.082	62	1.3	0.59	0.23	0.561	196581.20
0.83	1.00	0.911	37	1.1	0.67	0.22	0.667	265060.24
						1.00	2.379	723881.68

Tabla 118. Pérdida de carga en el medio filtrante

Hfi1 arena (VF)	6.74E-03	Vf
Hfi2 antracita (VF)	4.36E-03	Vf
Hfi3 ORIF. drenaje (VF)	4.64E-08	Vf ²
Hfi4 falso fdo. (VF)	2.46E-10	Vf ²
Hfi5 cpta.ent (VF)	7.79E-07	Vf ²
Hfi6 cpta SAL. F (VF)	6.29E+12	*VF ²
L.cresta vert. (m)	1	
Hfi7 vert. salida filtro (VF)	0.11	VF

Figura 104.

Vista de corte del replanteo de los filtros



4.19.5. Sistema de cloración

4.19.5.1. Observaciones del sistema de cloración

- La planta cuenta con 01 cilindro de 67Kg y cloradores de aplicación directa, el inconveniente de estos cloradores es la dosis que varía con la presión del cilindro. Véase la Figura 106.
- Durante la ejecución de la obra RECONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE SANEAMIENTO DE VILLA RICA – OXAPAMPA - PASCO” se construyó una nueva caseta de cloración con cloradores de inyección al vacío actualmente no se encuentran en operación debido a que la

obra no ha sido oficialmente entregada. Durante la visita a la casa de cloración se observó lo siguiente:

- Solo se cuenta con 01 cilindro, con lo cual se produce desabastecimiento durante el cambio de cilindro.
- Se cuenta con balanza para determinar el consumo de cloro, la cual se encuentra deteriorada.
- El cilindro no se encuentra debidamente asegurado con cadena como se muestra en la Figura 105.

Figura 105.

Tablero eléctrico en la sala de dosificación



Referente a la aplicación de cloro se observó:

- La aplicación del cloro se realiza posterior al vertedero de lavado de los filtros, lo cual es correcto.

Figura 106.

Aplicación de cloro por inyección directa



4.19.5.2. Recomendaciones para mejorar el sistema de cloración

- Poner en operación el sistema de inyección de cloro al vacío ya que este sistema es mucho más manejable y menos riesgoso para el personal encargado de la operación.
- Incrementar el número de cilindros de cloro para una dosificación constante
- Compra de balanzas operativas y en buenas condiciones para registrar el consumo de cloro y prever con anticipación.
- Los cilindros instalados deberán ser bien aseguradas con cadena para evitar cualquier tipo de accidente.

4.19.6. Lecho de secado

La planta cuenta con 02 lechos de secado de lodos, para recibir el agua de lavado de las unidades de la planta. Actualmente estos no se encuentran en operación, ya que la infraestructura se encuentra deteriorada por la fuerza del agua al llegar a esta unidad.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

- Se evaluó la calidad la calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable, los resultados del monitoreo indicaron que todos los valores se encuentran por debajo de los LMP establecidos por el reglamento de calidad de agua para consumo humano a excepción de color y turbidez por lo que fue necesario realizar pruebas de tratabilidad para la remoción de ambos parámetros.
- Se determinó la turbidez del agua en el afluente y efluente a través de monitoreos el valor promedio obtenido fue de 67.26 UNT en el mes de enero, por otro lado se cuenta con resultados de monitoreo diario de los años 2016 y 2017 en los que el 42% del tiempo el agua presenta una turbidez menor a 20 UNT, el 66 % del tiempo presenta turbidez menor a 50 UNT y el 83% del tiempo presenta turbidez menor a 100 UNT, los valores más altos se registraron en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo:
- Se determinó el color del agua en el afluente y efluente a través de monitoreos, en el mes de enero se registró en promedio 402.45 UCV, la media de los valores máximos alcanzó 792 UCV mientras que el promedio de los valores mínimos registrados fue de 207.93 UCV, no se tiene registros del color a lo largo del año, sin embargo, el nivel de color varía proporcionalmente a la turbidez.
- Se realizaron las pruebas de tratabilidad con dos muestras de agua (23 UNT y 453 UNT) empleando los tiempos y gradientes con los que opera la planta; el coagulante más óptimo para ambas muestras fue el sulfato de aluminio granulado tipo A a una concentración de 2.5 %. Para la muestra con turbidez de 23 UNT y color de 195 UCV la dosis optima fue de 30 mg/L logrando valores de turbidez de 9 UNT y color de 19 UCV; por otro lado, para la muestra con turbidez de 453 UNT

y color de 825 UCV la dosis óptima fue de 55 mg/L logrando valores de turbidez de 7 UNT y color de 26 UCV; las pruebas realizadas con distintos niveles de pH del agua y empleando polímero catiónico no tuvieron un efecto significativo en la remoción de turbidez y color

- Se determinaron los parámetros de diseño, aplicando tiempos de floculación de 10, 15, 20, 25, 30 y 35 minutos y gradientes de velocidad de 20 S⁻¹, 30 S⁻¹, 40 S⁻¹, 50 S⁻¹ y 60 S⁻¹ y pruebas de decantación. El gradiente de velocidad óptimo es de 40 S⁻¹ y el tiempo de floculación es de 30 min de, con dichos parámetros se obtuvieron porcentajes de remoción mayores al 90% de color y turbidez, en la muestra con turbidez de 23 UNT y 195 UCV se alcanzó 2 UNT y 6 UCV, en la muestra con turbidez de 453 UNT y 825 UCV se alcanzó 3 UNT y 7 UCV.
- Con los resultados óptimos de laboratorio se propuso un diseño de planta adecuado para reducir la turbidez y el color, en el sistema de dosificación se consideró la reubicación del difusor a la altura de la zona de turbulencia producida por el resalto hidráulico para favorecer el proceso de formación de los flocs, la instalación de un tubo difusor con 10 orificios de 3/8" espaciados a 0.07 m El canal con cambio de pendiente se ha mejorado cambiando las condiciones hidráulicas a la salida del canal logrando un resalto óptimo con un tiempo de mezcla de 2 segundos y un gradiente de velocidad de 1258 S⁻¹ . En el proceso de floculación, se ha incrementado el tiempo de retención de 23 min a 30 min, ajustándolo al tiempo óptimo determinado en laboratorio, también se considera cambiar las pantallas floculadores por nuevas unidades de fibra de vidrio, y su distribución se ha modificado de acuerdo a los gradientes óptimos de 40, 30 y 20 S⁻¹. En el proceso de decantación, se ha incrementado la tasa de decantación aparente de 28.2 m³/m²-día a 30.77 m³/m² -día, también se ha propuesto la mejora de la distribución

de caudal tanto al ingreso, como a lo largo de las unidades. Todas estas mejoras permitirán obtener un efluente menor a 2 UNT. En el proceso de filtración, se ha considerado cambiar el espesor de los medios filtrantes considerando un espesor de 0.3 m de arena y 0.50 m de antracita para alcanzar la expansión recomendable de 30%, también incrementar la altura de la caleta de lavado para evitar el ahogamiento de la canaleta durante el lavado del medio filtrante y así evitar que los sólidos removidos vuelvan a sedimentar.

CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES

- Realizar nuevas pruebas de tratabilidad para obtener resultados representativos y definirlos como parámetros de diseño de las unidades de la planta de tratamiento de agua potable
- Realizar pruebas de tratabilidad en las diferentes estaciones del año para conocer la influencia de la temperatura del agua en los procesos de coagulación y floculación
- Monitorear el color y la turbidez durante un año para contar con registros de las variaciones de la calidad del afluente con las diferentes estaciones del año.
- Realizar una evaluación a nivel planta, mediciones de las unidades y pruebas de trazadores para conocer los tiempos y gradientes de velocidad con los que trabaja la planta
- Aplicar otros insumos químicos o coagulantes para las pruebas de tratabilidad.
- Realizar la prueba F de Fisher para obtener modelos predictivos de la variable respuesta.

CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allerdings, D., Förster, G., Vasyukova, E., & Uhl, W. (2015). The practical influence of rapid mixing on coagulation in a full-scale water treatment plant. *Water Science and Technology*, 71.4, 566–572. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.492>
- Alvarado, C., Pérez, H., & Saba, C. (2014). Evaluation of the use of poly aluminum in conjunction with aluminum sulfate in the coagulation process in a water purification water plant in Carabobo state. *Ingeniería y Sociedad UC*, 10(1), 35–46. Recuperado de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/IngenieriaYSociedad/a10n1/art03.pdf>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation. (2001). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (17 th; D. de S. S.A., ed.). Madrid.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. En *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico* (p. 44).
- Apella, M. C., & Araujo, P. Z. (2005). Microbiología de agua. Conceptos básicos. En *Posibilidades para la provisión de agua segura usando nuevas tecnologías* (p. 302). Recuperado de <http://www.ine.es/normativa/leyes/incinor.htm>
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ra ed.). Recuperado de <https://edoc.pub/queue/teoria-y-practica-de-la-purificacion-del-h2o-tomo-1-arboleda-valencia-5-pdf-free.html>
- Asociación Nacional de la Industria Química. (2015). Sulfato de aluminio. Recuperado el 3 de diciembre de 2019, de [http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/Sulfato de Al.Sol. Libre de Fe\(toda LIT\).pdf](http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/Sulfato de Al.Sol. Libre de Fe(toda LIT).pdf)
- AWWA. (2017). TECH-TIP - Ensuring Accurate Turbidity Measurements through Turbidimeter Calibration and Verification. Recuperado de <https://www.awwa.org/AWWA-Articles/tech-tip-ensuring-accurate-turbidity-measurements-through-turbidimeter-calibration-and-verification>

- Ayora, M. (2010). *Tema: Análisis De Aguas* (Departamento de Química Física y Analítica Universidad de Jaén, Ed.). Recuperado de [http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica analitica ambiental/tema 10.pdf](http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica_analitica_ambiental/tema_10.pdf)
- Camacho, M. (2014). *Control y evaluación de la planta de tratamiento de agua potable y su incidencia en la calidad de vida de los habitantes de Caluma Nuevo del Cantón Caluma - Provincia de Bolívar*. Recuperado de [http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/7413/1/Tesis 775 - Camacho García Marlene Beatríz.pdf](http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/7413/1/Tesis_775_-_Camacho_García_Marlene_Beatríz.pdf)
- Castrillón, D., & Ángeles, M. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana* (Universidad tecnológica de Pereira). Recuperado de [http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3146/6281622H565 .pdf;sequence=1](http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3146/6281622H565.pdf;sequence=1)
- Catalina, A., & Velásquez, B. (2015). *Evaluación técnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Chocontá, Cundinamarca*.
- CEPIS. (2006). Decantadores laminares. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada* (pp. 134–179). LIMA.
- Cerón, V. (2016). *Estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa Empoobano E.S.P.* (Universidad de Nariño). Recuperado de http://sired.udenar.edu.co/3769/1/tg_vcp.pdf
- CESEL Ingenieros. (2012). *Proyecto: Reconstrucción de la Infraestructura de Saneamiento de Villa Rica – Oxapampa - Pasco*.
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 153–170.
- Clavijo, A. (2013). *Evaluación de la planta de tratamiento de agua potabile del municipio de Garzón - Huila* (Universidad Militar Nueva Granada). Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11706/Evaluación>

de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Garzón - Huila.pdf;sequence=1

- Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclорuro de aluminio. *DYNA*, 78(0012–7353), 18–27. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49622372002.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada*. Recuperado de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro24.pdf>
- De Vargas, L. (2004a). Floculación. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría* (pp. 264–306). Recuperado de http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/ma1_tomo1_cap6.pdf
- De Vargas, L. (2004b). Mezcla rápida. En CEPIS (Ed.), *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I* (pp. 226–262). Recuperado de http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/ma1_tomo1_cap5.pdf
- De Vargas, L. (2004c). Mezcladores. En *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada: Vol. Tomo II*. Lima.
- De Vargas, L. (2004d). Procesos unitarios de planta de tratamiento. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I* (pp. 104–150).
- De Vargas, L. (2004e). Procesos unitarios y plantas de tratamiento. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I* (pp. 104–150). Lima.
- De Vargas, L. (2009). Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. En CEPIS & OMS (Eds.), *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo II* (pp. 216–281). LIMA.
- Díaz, T. (2017). *Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua*

potable del municipio de Tena en el departamento de Cundinamarca.

Recuperado de

https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14490/1/Trabajo_21.pdf

Domínguez, F. (2010). *Optimización de la coagulación – floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre – Cajasan* (Universidad Pontificia Bolivariana). Recuperado de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/848/digital_19174.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Dueñas, R. (2016). *Evaluación y Mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable del centro poblado de Yauri, distrito de Yauri, Provincia de Espinar, Cusco*. Universidad Católica de Santa María.

ECOFLUIDOS INGENIEROS. (2012). *Estudio de la calidad de fuentes utilizadas para consumo humano y plan de mitigación por contaminación por uso doméstico y agroquímicos en Apurímac y Cusco*.

EPS Selva Central S.A. (2014). *Plan Maestro Optimizado 2014-2018* (p. 305). p. 305.

Fernández, A., & Du Mortier, C. (2005). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. En *Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías* (pp. 17–32). Recuperado de https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf

Fondriest Environmental Inc. (2014). Water temperature. Recuperado el 14 de julio de 2019, de Fundamentals of Environmental Measurements website: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/>

Göransson, G., Larson, M., & Bendz, D. (2013). Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system - River Göta Älv, SW Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10, 255–293. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-255-2013>

Hudson, H. E. (1965). Physical Aspects of Flocculation. *Journal - American Water Works Association*, 57(7), 885–892. <https://doi.org/10.1002/j.1551->

8833.1965.tb01476.x

Hui, X., Djati, H., & Zhi, H. (2011). Correlation between turbidity and total suspended solids in Singapore rivers. *Journal of Water Sustainability*, 1(3), 313–322.

Recuperado de http://jwsponline.com/uploadpic/Magazine/pp_313-322_JWS-A013_New.pdf

INEI. (2010). *Pasco: Compendio estadístico*. Recuperado de

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0971/libro.pdf

IWA. (2019a). Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment.

Recuperado el 25 de julio de 2019, de

<https://www.iwapublishing.com/news/coagulation-and-flocculation-water-and-wastewater-treatment>

IWA. (2019b). Sedimentation Processes. Recuperado el 28 de octubre de 2019, de

<https://www.iwapublishing.com/news/sedimentation-processes>

Kan, C., Huang, C.-P., & Ruhsing Pan, J. (2002). Time requirement for rapid-mixing in coagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 203, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)01095-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)01095-0)

Lorenzo, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba*, 40(0138–6204), 10–17. Recuperado de

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

Maldonado, V. (2004a). Filtración. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo II* (pp. 82–152). Lima: CEPIS.

Maldonado, V. (2004b). Sedimentación. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo II*.

Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. del C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre. *Higiene y sanidad ambiental*, 4, 72–82.

- Marín, R. (2010). *Características físicas, químicas y biológicas de las aguas*. Recuperado de <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/19900/caracteristicas-fisicas-quimicas-y-biologicas-de-las-aguas>
- Marín, R. (2018). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos Tratamiento y control de calidad de aguas. Tratamiento y control de calidad de aguas*. (Segunda ed; Díaz de Santos S.A., Ed.). Recuperado de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788490522103.pdf>
- Martínez, M. (2015). *Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano* (Universidad Nacional Autónoma De México). Recuperado de <https://studylib.es/doc/7558024/uso-de-polimeros-en-el-tratamiento-de-agua>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. *O.S. 020 Plantas de tratamiento de agua para consumo humano.* , Pub. L. No. O.S. 020, 1 (2009).
- MINITAB. (2019). ¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken? - Minitab. Recuperado el 12 de noviembre de 2019, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- MINSA. *Reglamento de calidad de agua para consumo humano.* , Pub. L. No. D.S. N° 031-2010-SA, 46 (2011).
- Molada, D. (2006). *Lavanderas Del Servicio Gallego de Salud*. (Primera ed; Editorial Mad S.L., Ed.). Recuperado de https://books.google.com.pe/books/about/Lavanderos_as_del_Servicio_Gallego_de_Sa.html?id=nes-QwAACAAJ&hl=en&output=html_text&redir_esc=y
- Montgomery, D. (2011). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda Ed; L. Wiley, Ed.). México.
- MRWA. (2009). Coagulation and flocculation. En *Minnesota water works operations manual* (Fourth, p. 6). Minnesota.
- Ordoñez, F., & Paz, D. (2016). *Determinación del gradiente y tiempo óptimo de floculación*.
- Oré, L. (2014). *Evaluación de la eficiencia del floculante de sulfato de aluminio y*

polifloc (polifloc de aluminio) empleado en la depuración de aguas con baja turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable Quicapata-Ayacucho (Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga). Recuperado de http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/handle/UNSCH/1037/Tesis_Q476_Ore.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Orellana, J. (2005). Tratamiento de las aguas. En *Ingeniería Sanitaria* (p. 123). Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (3° edición). Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

Pacheco, V. (2005). Control de calidad. En CEPIS (Ed.), *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual IV Operación mantenimiento y control de calidad*. (pp. 248–282). Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual4/cap6.pdf>

Pérez, F., & Urrea, M. (2016). *Abastecimiento de aguas*.

Pérez, J. (2017). *Evaluación de la sustitución del agente coagulante sulfato de aluminio en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP* (Fundación Universidad de América). Recuperado de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6371/1/6112811-2017-2-IQ.pdf>

Ramírez, F. (2019). La coagulación -Floculación en el proceso de tratamiento. Recuperado el 26 de julio de 2019, de <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>

Redondo, E., & López, C. (2016). *Evaluación de la calidad del agua en la planta potabilizadora el dorado (Bogotá) a través del análisis estadístico de series de tiempo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable*.

Rinne, T. (2010). *Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro*.

- Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>
- Sánchez, D. (2011). Método de las Superficies de Respuesta. En *Diseño óptimo de laminados en materiales compuestos. Aplicación del método de las superficies de respuesta* (pp. 88–97). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+7.pdf>
- SENAMHI. (2019a). Clima / Mapa Climático del Perú. Recuperado el 29 de agosto de 2019, de <https://senamhi.gob.pe/?&p=mapa-climatico-del-peru>
- SENAMHI. (2019b). Datos hidrometeorológicos en Pasco. Recuperado el 19 de septiembre de 2019, de <https://senamhi.gob.pe/main.php?dp=pasco&p=estaciones>
- SENAMHI. (2019c). *Monitoreo hidrológico Río Perené*. Recuperado de <https://senamhi.gob.pe/?&p=monitoreo-hidrologico>
- SENAMHI. (2019d). *Monitoreo hidrológico Río Tulumayo*. Recuperado de <https://senamhi.gob.pe/?&p=monitoreo-hidrologico>
- SUNASS. (2004a). *Análisis de la calidad del agua potable en las empresas prestadoras del Perú: 1995-2003*. LIMA.
- SUNASS. (2004b). *La calidad del agua potable en el Perú*. Lima.
- SUNASS. (2016). *Benchmarking regulatorio de las EPS*. Recuperado de https://www.sunass.gob.pe/benchmark/benchmarking_datos_2016.pdf
- Tafur, E. (2017). *Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba* (Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto). Recuperado de <http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3044/SANITARIA - Erickson Henner Tafur Bardales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tan, W., Thishalini, A., Goh, E., & Edlic, S. (2017). Studies on turbidity in relation to suspended solid, velocity, temperature, pH, conductivity, colour and time. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(19), 5626–5635. Recuperado de www.arpnjournals.com
- TWT. (2010). Flocculation basin. Recuperado el 29 de noviembre de 2019, de

<http://www.thewatertreatments.com/wastewater-sewage-treatment/317/>

U.S. Geological Survey. (2012). Temperature and water. Recuperado el 14 de julio de 2019, de https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/temperature-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

WHO. (2012). *Rapid assessment of drinking-water quality: a handbook for implementation*. Geneva.

CAPÍTULO VIII ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Objetivos	Hipótesis	Variables
Problema General	Hipótesis general	Independientes
Objetivo General	Hipótesis general	Independientes
PG: ¿La calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica cumple con el reglamento de calidad de agua para consumo humano?	Hg: La calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica cumple con el reglamento de calidad de agua para consumo humano.	Dosis de coagulante Tiempo de retención Gradiente de velocidad
Objetivos	Hipótesis	Variables
Problema Específicos	Hipótesis Específicas	Dependientes
Objetivo Específicos	Hipótesis Específicas	Dependientes
PE1: ¿La turbidez del agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua para consumo humano?	HE1: La turbidez del agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua.	Eficiencia de remoción de color Eficiencia de remoción de turbidez.
PE2: ¿El color de agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua para consumo humano?	HE2: El color de agua en el efluente de la planta de tratamiento cumple con los límites establecidos en el Reglamento de calidad de agua.	
PE3: ¿Los parámetros de dosificación de insumos químicos como: Tipo, dosis y concentraciones de coagulantes son óptimos para la remoción de color y turbidez del agua?	HE3: Los parámetros óptimos de dosificación de insumos químicos como Tipo, dosis y concentraciones óptimas de coagulantes son óptimos.	
PE4: ¿Los parámetros de diseño como: Tiempo de floculación y gradientes de velocidad son óptimos para permitir la remoción de color y turbidez?	HE4: Los parámetros de diseño como Tiempo de floculación y gradientes de velocidad son óptimos para permitir la remoción de color y turbidez.	
PE5: ¿El diseño de las unidades de la planta es adecuado para la reducción de color y turbidez en el agua?	HE5: El diseño de las unidades de la planta es adecuado para la reducción de color y turbidez en el agua.	

Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables

Variables Variables independientes	Definición		Indicadores
	Definición teórica	Definición operativa	
Dosis de coagulante	Es la cantidad de coagulante que se aplica al agua para su tratamiento.	Es la cantidad de insumo químico expresado en miligramos (mg) disuelto en un volumen de agua expresado en litros (L).	Miligramos por litro (mg/L)
Tiempo de retención	Es el tiempo que demora el agua en pasar por las diferentes secciones del floculador.	Tiempo expresado en minutos.	Minutos (min)
Gradiente de velocidad	Se define a través de la potencia específica de movimiento transferida a un fluido.	Representa la frecuencia de repetición de un ciclo en un segundo.	S ⁻¹
Variables dependientes			
Eficiencia de remoción de color	Es la capacidad que tiene un determinado factor para remover del agua unidades nefelométricas de turbidez.	Es la cantidad que representa la turbidez removida respecto a la turbidez inicial, dividida en cien unidades.	Porcentaje de remoción (%)
Eficiencia de remoción de turbidez.	Es la capacidad que tiene un determinado factor para remover del agua unidades de color verdadero.		

Anexo 4. Datos meteorológicos – Estación meteorológica Pasco

Mes	Temperatura			Humedad relativa	Precipitación (mm/mes)
	(°C)			(%)	
	Max	Min	Prom		Total
Enero	23.5	13.6	18.5	85.0	347.7
Febrero	23.7	14.1	18.9	86.0	227.6
Marzo	23.8	14.2	19.0	87.6	188.2
Abril	23.3	13.0	18.2	86.1	175.8
Mayo	24.0	12.7	18.4	84.4	32.8
Junio	23.1	11.9	17.5	85.2	78.4
Julio	23.1	11.0	17.0	81.9	58.6
Agosto	23.3	11.5	17.4	82.4	75.1
Septiembre	24.9	11.8	18.3	80.5	27.7
Octubre	23.3	13.8	18.6	86.5	188.9
Noviembre	24.4	14.7	19.5	85.6	146.9
Diciembre	23.6	14.2	18.9	84.5	302.4
Enero	22.4	14.2	18.3	87.6	306.7
Febrero	22.6	14.8	18.7	87.4	313.6
Marzo	23.9	14.6	19.2	83.8	192.6
Abril	23.9	14.2	19.1	86.5	82.3
Mayo	24.4	14.1	19.2	85.7	83.1
Junio	24.4	12.1	18.3	85.2	41.1
Julio	23.5	12.3	17.9	83.9	38.4
Agosto	23.7	10.0	16.9	81.5	16.1
Septiembre	23.3	11.3	17.3	85.4	56.1
Promedio	23.6	13.0	18.7	84.9	9.5
Máximo	22.4	10.0	16.9	80.5	16.1
Mínimo	24.9	14.8	19.5	87.6	347.7

Anexo 5. Constancia de aprobación de la EPS Selva Central para realizar pruebas de laboratorio en la PTAP de Villa Rica



**ENTIDAD PRESTADORA DE SERVICIOS DE
SANEAMIENTO
“SELVA CENTRAL” S.A.
CHANCHAMAYO – OXAPAMPA – SATIPO**

“Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad”

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

El que suscribe Ing. Remigio David FERNÁNDEZ ARELLANO Jefe de la Unidad Operativa Villa Rica de la E.P.S. SELVA CENTRAL S.A. , ubicado en Jr. Antonio Richle cuadra 4 Villa Rica-Oxapampa-Pasco.

HACE CONSTAR

Que habiendo recibido la solicitud de los estudiantes egresados de la E.P. de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, Melissa Guadalupe Huasco Cuchacha y Daniel Eduardo Cama Luque identificados con DNI 77497443 y 73236187 respectivamente requiriendo realizar pruebas de laboratorio en las instalaciones de la planta de tratamiento de Villa Rica – Pasco como parte del proyecto de tesis titulado **“Evaluación para la reducción de turbiedad y color en la planta de tratamiento de agua potable de Villa Rica – Pasco”**, se les otorga la autorización respectiva para el desarrollo de sus actividades.

Se expide la siguiente constancia a solicitud de los interesados para los fines que se consideren convenientes.

Villa Rica, Agosto del 2019

Atentamente

EPS SELVA CENTRAL S.A.
CHANCHAMAYO – OXAPAMPA – SATIPO

Ing. Remigio David Fernández Arellano
JEFE U.C. VILLA RICA

Anexo 6. Registro de monitoreo de la calidad de agua en la planta

Día	Hora	Caudal tratado (L/s)	Turbiedad (NTU)						Color aparente (UCV)						pH				Conductividad (µs/cm)		Alcalinidad			
			Ent.	Decantadores				Filt.	Ent.	Decantadores				Filt.	Ent.	Decantadores			Prom.	Filt.	Ent.	Filt.	Ent.	
				1	2	3	4			1	2	3	4			1	2	3						4
4	13:00	57.721	124.0	1.7	3.3	40.5	3.1	7.5	854.0	17.0	18.0	205.0	38.0	5.0	8.7	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	-	-	68.0
	15:00	57.721	47.9	18.1	-	9.8	5.2	7.4	359.0	131.0	-	60.0	54.0	21.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16:00	57.721	21.4	29.3	-	8.8	10.2	29.1	232.0	115.0	-	50.0	50.0	201.0	8.3	7.5	7.7	7.6	7.8	7.6	-	-	-	-
	17:00	57.721	20.9	-	15.9	25.3	18.6	13.5	227.0	-	126.0	157.0	85.0	97.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	09:00	57.721	20.2	6.0	3.6	2.8	2.5	3.1	207.0	65.0	78.0	64.0	68.0	76.0	7.9	7.5	7.6	7.6	7.5	7.6	7.4	130.0	150.0	66.0
	11:00	57.721	37.4	4.0	3.3	7.2	6.2	7.2	356.0	76.0	64.0	85.0	46.0	94.0	-	-	-	-	-	-	-	128.3	136.8	-
	13:00	57.721	31.5	16.1	21.6	12.4	17.2	19.5	310.0	144.0	198.0	139.0	168.0	185.0	8.0	6.7	6.8	6.8	6.7	7.0	6.7	124.2	164.5	-
	15:00	57.721	20.3	11.9	19.1	15.3	14.0	16.8	218.0	136.0	189.0	178.0	147.0	148.0	-	-	-	-	-	-	-	122.9	142.2	-
	17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	09:00	57.721	15.9	13.1	13.3	11.6	12.2	5.1	202.0	196.0	213.0	208.0	184.0	88.0	8.3	7.7	7.9	7.7	7.8	7.9	8.0	118.5	130.2	62.0
	11:00	57.721	37.9	7.2	7.4	6.0	6.8	6.4	348.0	82.0	100.0	90.0	130.0	77.0	-	-	-	-	-	-	-	115.9	130.2	-
	13:00	57.721	53.0	15.34	24.0	39.5	31.7	12.4	533.0	98.0	175.0	129.0	144.0	82.0	8.3	7.3	7.4	7.6	7.6	7.7	100.5	120.5	-	
	15:00	57.721	111.0	5.0	49.6	47.6	74.6	32.2	1200.0	440.0	390.0	384.0	474.0	244.0	-	-	-	-	-	-	-	93.1	123.6	-
	17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	09:00	57.721	25.2	12.2	13.5	13.5	13.4	7.7	259.0	125.0	152.0	161.0	172.0	105.0	7.7	7.2	7.3	7.3	7.3	7.4	7.2	105.9	119.0	68.0
	11:00	57.721	1070.0	11.2	7.6	5.0	5.1	67.0	6340.0	83.0	71.0	44.0	38.0	93.0	-	-	-	-	-	-	-	104.5	127.6	-

	13:00	57.721	170.0	24.5	25.3	24.0	23.0	7.2	1360.0	190.0	163.0	167.0	176.0	77.0	7.6	5.1	5.4	5.2	5.4	5.8	5.9	108.6	168.6	-
	15:00	57.721	164.0	313.0	361.0	326.0	467.0	18.9	1248.0	158.0	2600.0	2720.0	3620.0	150.0	-	-	-	-	-	-	-	104.0	130.3	-
	17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	09:00	54.423	26.5	17.7	18.6	17.2	6.8	10.0	299.0	203.0	196.0	185.0	79.0	142.0	8.1	7.2	7.1	7.0	7.1	7.3	7.2	107.9	130.0	74.0
	09:00	57.721	12.8	6.3	14.4	8.0	7.7	5.5	-	-	-	-	-	-	7.8	7.7	8.1	8.1	8.0	7.9	8.1	-	-	63.0
	11:00	57.721	15.7	7.4	13.5	9.7	8.9	8.6	-	-	-	-	-	-	7.7	7.4	7.6	7.5	7.5	7.6	7.5	-	-	-
9	13:00	57.721	15.8	6.3	11.6	16.4	8.6	8.7	-	-	-	-	-	-	7.4	7.6	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	-	-	-
	15:00	57.721	10.9	6.7	15.3	10.7	10.2	5.6	-	-	-	-	-	-	7.2	7.4	7.4	7.5	7.4	7.4	7.3	-	-	-
	17:00	57.721	14.0	8.5	11.0	10.5	11.5	6.2	-	-	-	-	-	-	6.5	6.1	6.0	6.0	6.0	6.1	5.9	-	-	-
	09:00	57.721	564.0	16.5	6.1	8.9	9.0	2.7	-	-	-	-	-	-	7.8	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.6	-	-	70.0
	11:00	57.721	394.0	104.0	87.0	87.0	87.0	30.1	-	-	-	-	-	-	8.1	8.0	8.0	8.0	7.9	8.0	7.9	-	-	-
10	13:00	57.721	180.0	17.8	9.4	10.5	14.2	1.3	-	-	-	-	-	-	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	-	-	-
	15:00	57.721	93.0	17.4	37.6	36.8	28.9	3.1	-	-	-	-	-	-	8.4	8.2	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1	-	-	-
	17:00	57.721	50.0	10.3	93.0	84.0	101.0	101.0	-	-	-	-	-	-	8.3	8.1	8.1	8.2	8.2	8.2	8.1	-	-	-
	09:00	57.721	226.0	11.4	7.2	11.1	12.9	8.5	-	-	-	-	-	-	8.2	8.1	8.0	8.0	8.0	8.1	7.9	110.0	180.0	64.0
	11:00	57.721	308.0	4.3	27.4	13.2	50.0	4.1	-	-	-	-	-	-	8.1	8.1	7.8	7.8	7.9	8.0	7.8	130.0	180.0	-
11	13:00	57.721	317.0	59.0	56.0	64.0	57.0	15.7	-	-	-	-	-	-	8.3	8.0	8.1	8.1	8.2	8.1	8.1	80.0	170.0	-
	15:00	57.721	265.0	19.5	14.3	16.2	19.3	11.9	-	-	-	-	-	-	8.5	8.2	8.0	8.4	8.0	8.3	8.1	90.0	160.0	-
	17:00	57.721	218.0	10.1	36.4	47.2	45.6	6.6	-	-	-	-	-	-	8.5	8.1	8.0	8.0	8.0	8.2	8.1	100.0	160.0	-
12	09:00	57.721	34.5	32.1	30.1	26.8	27.7	23.0	-	-	-	-	-	-	8.5	8.0	7.9	7.6	7.9	8.0	8.0	110.0	170.0	61.0

	11:00	57.721	30.3	27.1	26.1	24.3	28.8	21.7	-	-	-	-	-	-	8.5	7.2	7.1	7.1	7.3	7.4	7.1	120.0	180.0	-
	13:00	57.721	32.5	28.2	28.7	28.1	28.7	23.7	-	-	-	-	-	-	8.5	7.2	7.3	7.3	7.3	7.5	7.3	110.0	160.0	-
	09:00	57.721	28.7	6.9	16.2	18.5	15.0	3.0	-	-	-	-	-	-	8.1	7.5	7.5	7.7	7.6	7.7	7.2	130.0	160.0	72.0
	11:00	57.721	182.0	5.3	21.6	17.2	16.9	4.5	-	-	-	-	-	-	8.5	7.7	7.7	7.7	7.4	7.9	7.5	150.0	170.0	-
14	13:00	57.721	158.0	10.0	43.1	37.1	41.2	6.9	-	-	-	-	-	-	8.5	7.6	7.8	7.5	7.5	7.8	7.4	120.0	170.0	-
	15:00	57.721	180.0	35.9	30.9	27.9	27.3	36.4	-	-	-	-	-	-	8.5	7.5	7.6	7.6	7.6	7.8	7.6	100.0	150.0	-
	17:00	57.721	214.0	5.0	53.0	26.9	52.0	2.6	1992.0	19.0	361.0	175.0	348.0	0.0	8.5	7.6	7.6	7.7	7.6	7.8	7.4	90.0	150.0	-
	09:00	57.721	23.0	11.5	15.0	31.4	26.4	13.8	245.0	125.0	201.0	300.0	149.0	164.0	8.2	7.6	7.7	7.6	7.7	7.8	7.6	130.0	140.0	60.0
	11:00	57.721	24.1	14.0	21.6	34.9	17.1	16.5	234.0	111.0	193.0	307.0	132.0	153.0	8.2	7.6	7.5	7.6	7.5	7.7	7.5	130.0	140.0	-
15	13:00	57.721	25.0	21.4	31.5	33.8	39.0	20.6	218.0	221.0	303.0	304.0	356.0	195.0	8.1	7.5	7.4	7.4	7.4	7.6	7.4	140.0	150.0	-
	15:00	57.721	27.0	22.7	28.5	31.1	32.0	19.7	435.0	353.0	402.0	376.0	394.0	211.0	8.2	7.9	7.8	7.8	7.8	7.9	7.8	140.0	150.0	-
	17:00	57.721	177.0	6.5	27.9	27.6	15.3	8.5	1288.0	19.0	153.0	151.0	81.0	29.0	8.5	7.2	7.2	7.2	7.3	7.5	7.3	150.0	160.0	-
	09:00	57.721	17.4	4.2	11.6	11.9	16.0	2.2	162.0	17.0	100.0	98.0	135.0	9.0	8.2	7.5	7.4	7.4	7.6	7.6	7.5	160.0	170.0	72.0
	11:00	57.721	23.9	5.4	6.7	11.3	6.9	4.2	175.0	43.0	55.0	73.0	34.0	19.0	7.9	7.5	7.6	7.4	7.5	7.6	7.6	160.0	180.0	-
16	13:00	57.721	22.3	3.8	20.0	15.5	13.8	7.8	176.0	18.0	133.0	93.0	83.0	52.0	8.1	7.7	7.7	7.6	7.4	7.7	7.6	160.0	170.0	-
	15:00	57.721	21.4	6.4	11.6	17.3	18.4	9.1	152.0	29.0	64.0	115.0	93.0	60.0	8.4	7.3	7.4	7.3	7.4	7.6	7.3	170.0	170.0	-
	17:00	57.721	17.0	4.7	6.3	11.5	4.7	4.6	129.0	39.0	100.0	127.0	52.0	36.0	8.4	7.8	7.9	8.0	7.7	8.0	7.9	160.0	180.0	-
	09:00	57.721	24.8	28.4	12.4	66.5	56.6	22.0	189.0	150.0	288.0	243.0	313.0	86.0	8.5	7.9	7.6	7.6	7.3	7.8	7.2	104.3	128.7	-
17	11:00	57.721	24.0	25.1	17.7	55.7	69.5	23.8	244.0	156.0	213.0	339.0	235.0	92.0	8.4	7.4	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6	110.0	121.8	-
	13:00	57.721	63.0	24.3	26.7	72.0	60.0	27.8	394.0	175.0	297.0	434.0	353.0	181.0	8.5	7.1	7.1	7.1	7.3	7.4	7.2	96.1	112.4	-

	15:00	57.721	24.8	19.2	29.2	58.9	70.9	22.5	323.0	161.0	236.0	257.0	253.0	185.0	8.0	7.5	7.5	7.4	7.5	7.6	7.4	97.2	114.8	-
	17:00	57.721	55.8	18.9	10.5	63.3	59.4	14.9	144.0	120.0	210.0	335.0	267.0	97.0	8.0	7.4	7.4	7.3	7.4	7.5	7.3	94.5	118.8	-
	09:00	57.721	82.9	45.1	69.3	50.4	54.1	37.4	605.0	407.0	694.0	506.0	774.0	494.0	8.1	7.3	7.3	7.5	7.4	7.4	7.3	95.0	102.6	80.0
	11:00	57.721	56.3	40.9	69.0	54.6	56.9	31.1	547.0	389.0	581.0	546.0	706.0	479.0	8.0	7.9	7.6	7.5	7.5	7.6	7.6	96.1	105.0	-
18	13:00	57.721	46.0	45.1	68.0	70.0	86.0	27.4	524.0	368.0	662.0	748.0	980.0	393.0	8.0	7.1	7.7	6.7	6.7	6.8	6.8	103.8	107.3	-
	15:00	57.721	33.1	47.5	68.0	63.9	65.0	38.0	456.0	660.0	619.0	641.0	774.0	464.0	8.4	8.7	7.1	7.8	7.2	7.7	7.6	101.0	105.7	-
	17:00	57.721	32.7	77.0	67.0	61.0	58.0	52.0	375.0	716.0	616.0	638.0	676.0	470.0	8.4	7.6	7.5	7.6	7.7	7.6	7.8	94.8	101.2	-
	09:00	57.721	23.4	6.3	20.3	17.3	27.5	27.0	201.0	81.0	165.0	149.0	234.0	267.0	8.1	7.4	7.3	7.2	7.4	7.4	7.7	117.0	127.1	68.0
19	11:00	57.721	20.0	8.5	24.8	19.9	16.6	13.3	223.0	247.0	245.0	204.0	185.0	130.0	7.8	7.3	7.3	7.4	7.4	7.3	7.5	132.5	126.1	-
	13:00	57.721	17.1	10.2	13.8	18.3	19.2	12.6	199.0	111.0	154.0	171.0	176.0	119.0	7.8	7.2	7.3	7.2	7.3	7.3	7.5	127.8	129.9	-
	09:00	57.721	12.8	6.1	8.7	9.4	7.5	4.2	134.0	76.0	85.0	89.0	86.0	65.0	8.0	7.5	7.3	7.3	7.2	7.3	8.1	140.8	149.7	84.0
	11:00	57.721	10.4	2.6	10.4	9.0	7.4	3.7	129.0	35.0	108.0	101.0	40.0	55.0	8.3	7.5	7.5	7.4	7.4	7.4	7.6	135.4	147.1	-
21	13:00	57.721	12.6	3.9	7.0	5.6	6.9	3.7	139.0	40.0	74.0	65.0	71.0	62.0	8.3	7.8	7.6	7.6	7.5	7.6	7.5	136.3	143.8	-
	15:00	57.721	12.4	11.1	8.0	8.3	7.9	5.1	126.0	110.0	118.0	102.0	93.0	70.0	8.6	7.7	7.4	7.6	7.9	7.7	7.2	136.3	143.5	-
	17:00	57.721	9.4	11.2	11.7	13.3	13.5	6.9	109.0	137.0	130.0	137.0	131.0	82.0	8.6	8.0	8.0	8.0	7.9	8.0	8.1	136.0	143.0	-
	09:00	57.721	16.3	15.1	12.9	10.9	13.3	10.4	137.0	129.0	112.0	110.0	119.0	108.0	8.4	8.0	7.6	7.5	7.5	7.6	8.1	140.3	142.3	80.0
	11:00	57.721	14.1	3.0	5.6	6.7	4.0	1.8	143.0	37.0	40.0	84.0	37.0	26.0	8.4	7.6	7.5	7.4	7.4	7.5	7.9	139.0	152.2	-
22	13:00	57.721	12.3	4.8	7.5	7.5	6.8	2.3	135.0	53.0	67.0	81.0	71.0	30.0	8.3	7.7	7.6	7.5	7.5	7.6	7.9	140.0	145.5	-
	15:00	57.721	106.0	20.9	29.6	32.3	27.4	8.2	660.0	195.0	243.0	276.0	237.0	76.0	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6	138.5	145.0	-
	17:00	57.721	84.0	63.0	41.7	51.0	38.7	19.8	602.0	412.0	210.0	330.0	250.0	160.0	8.3	7.1	7.0	7.1	7.5	7.2	7.7	139.2	148.7	-

23	09:00	57.721	86.0	39.7	50.0	53.0	50.0	19.9	702.0	396.0	451.0	442.0	433.0	125.0	8.2	7.5	7.3	7.5	7.4	7.4	7.4	129.7	136.8	76.0
	11:00	57.721	69.0	18.4	19.9	18.6	19.6	12.0	470.0	137.0	172.0	144.0	154.0	111.0	8.1	7.3	7.3	7.2	7.2	7.3	7.2	129.0	139.2	-
	13:00	57.721	28.1	7.6	22.8	21.9	21.4	12.1	354.0	74.0	188.0	144.0	160.0	103.0	8.5	7.2	7.7	7.2	7.8	7.5	7.6	130.0	139.5	-
	15:00	57.721	18.0	4.6	28.8	25.3	22.9	11.1	164.0	45.0	213.0	184.0	168.0	86.0	7.9	7.4	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	132.5	139.6	-
	17:00	57.721	18.8	9.2	29.3	14.5	27.1	16.1	182.0	98.0	260.0	137.0	231.0	148.0	8.1	7.5	7.5	7.4	7.5	7.5	7.5	132.1	146.0	-
24	09:00	57.721	23.0	30.9	24.9	23.6	21.4	17.0	273.0	313.0	293.0	273.0	280.0	220.0	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	7.9	122.8	108.3	72.0
	11:00	57.721	18.1	30.7		5.4	7.8	5.5	241.0	294.0		69.0	92.0	79.0	8.2	7.6		7.3	7.1	7.3	7.5	122.5	135.4	-
	13:00	57.721	17.9	30.3	16.4	8.2	9.7	7.4	234.0	264.0	250.0	161.0	200.0	91.0	8.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.7	7.8	122.6	134.7	-
	15:00	57.721	14.6	17.2	18.6	20.1	24.9	10.5	188.0	221.0	232.0	245.0	280.0	147.0	8.2	7.6	7.5	7.4	7.3	7.5	7.3	122.6	130.3	-
	17:00	57.721	9.1	11.7	14.5	12.7	14.0	8.6	158.0	161.0	179.0	157.0	178.0	146.0	8.3	8.0	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9	121.4	126.6	-
25	09:00	57.721	10.5	-	-	-	-	9.5	159.0	-	-	-	-	130.0	8.4	-	-	-	-	-	8.2	128.0	127.9	76.0
	11:00	57.721	10.0	-	-	-	-	9.5	150.0	-	-	-	-	128.0	8.5	-	-	-	-	-	8.5	-	-	-
	13:00	57.721	10.4	-	-	-	-	9.8	165.0	-	-	-	-	134.0	8.4	-	-	-	-	-	8.4	-	-	-
	15:00	57.721	10.7	-	-	-	-	9.7	170.0	-	-	-	-	138.0	8.5	-	-	-	-	-	8.3	-	-	-
	17:00	57.721	10.4	-	-	-	-	9.2	173.0	-	-	-	-	140.0	8.5	-	-	-	-	-	8.5	-	-	-
26	09:00	57.721	7.7	-	-	-	-	5.7	100.0	-	-	-	-	86.0	8.5	-	-	-	-	-	8.4	150.9	149.0	80.0
	11:00	57.721	6.6	-	-	-	-	4.4	100.0	-	-	-	-	97.0	8.5	-	-	-	-	-	8.4	143.2	141.4	-
	13:00	57.721	5.7	-	-	-	-	4.3	98.0	-	-	-	-	84.0	8.5	-	-	-	-	-	8.1	140.1	139.8	-
28	09:00	57.721	9.7	-	-	-	-	5.2	139.0	-	-	-	-	120.0	8.5	-	-	-	-	-	8.5	140.1	136.7	84.0
	11:00	57.721	9.8	-	-	-	-	5.2	123.0	-	-	-	-	117.0	-	-	-	-	-	-	-	142.3	137.9	-

	13:00	57.721	9.7	-	-	-	-	5.2	113.0	-	-	-	-	105.0	8.6	-	-	-	-	-	8.5	145.2	138.9	-
	15:00	57.721	6.4	-	-	-	-	5.1	97.0	-	-	-	-	91.0	-	-	-	-	-	-	-	141.5	142.7	-
	17:00	57.721	6.2	-	-	-	-	5.3	96.0	-	-	-	-	93.0	8.5	-	-	-	-	-	8.5	141.9	139.7	-
	09:00	57.721	9.8	-	-	-	-	5.9	121.0	-	-	-	-	110.0	8.6	-	-	-	-	-	8.5	-	-	80.0
	11:00	57.721	9.4	-	-	-	-	5.7	119.0	-	-	-	-	107.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	13:00	57.721	9.3	-	-	-	-	5.7	115.0	-	-	-	-	103.0	8.6	-	-	-	-	-	8.6	-	-	-
	15:00	57.721	9.2	-	-	-	-	6.0	116.0	-	-	-	-	109.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17:00	57.721	9.4	-	-	-	-	5.8	121.0	-	-	-	-	105.0	8.5	-	-	-	-	-	8.5	-	-	-
	09:00	57.721	3.4	-	-	-	-	3.0	80.0	-	-	-	-	79.0	8.4	-	-	-	-	-	8.4	154.2	153.3	88.0
	11:00	57.721	2.4	-	-	-	-	2.5	77.0	-	-	-	-	69.0	-	-	-	-	-	-	-	154.0	155.8	-
30	13:00	57.721	2.3	-	-	-	-	2.6	78.0	-	-	-	-	78.0	8.4	-	-	-	-	-	8.3	155.4	155.1	88.0
	15:00	57.721	12.2	-	-	-	-	12.2	172.0	-	-	-	-	169.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17:00	57.721	23.6	2.3	11.7	6.1	8.6	1.9	185.0	19.0	81.0	55.0	61.0	24.0	8.6	8.4	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	143.7	162.3	88.0
	13:00	57.721	216.0	51.9	171.6	144.1	138.9	19.1	1336.0	978.0	824.0	735.0	738.0	180.0	8.2	7.0	7.2	7.2	7.4	7.2	7.3	90.0	132.0	80.0
31	15:00	57.721	167.8	12.8	120.2	128.4	134.7	15.8	1279.0	658.0	788.0	706.0	677.0	159.0	-	-	-	-	-	-	-	95.4	133.6	-
	17:00	57.721	149.0	6.0	90.0	108.0	123.7	5.4	940.0	57.0	766.0	654.0	598.0	138.0	8.3	6.9	7.3	7.2	7.4	7.2	7.3	86.8	127.9	80.0
	09:00	57.721	25.1	23.3	24.4	19.5	21.3	17.6	300.0	279.0	255.0	261.0	286.0	240.0	8.2	7.6	7.7	7.8	7.7	7.7	7.6	111.1	119.3	84.0
	11:00	57.721	26.1	22.4	22.2	18.2	22.9	18.6	295.0	254.0	285.0	249.0	285.0	248.0	-	-	-	-	-	-	-	109.0	117.8	-
1	13:00	57.721	27.6	25.3	27.1	25.5	22.0	19.3	313.0	256.0	307.0	290.0	285.0	236.0	8.2	7.6	7.5	7.8	7.8	7.7	7.7	-	-	84.0
	15:00	57.721	30.9	29.3	22.5	24.9	29.9	20.2	326.0	292.0	271.0	285.0	305.0	234.0	-	-	-	-	-	-	-	106.7	-	-

	17:0 0	57.721	50.4	28.0	36.0	40.0	45.0	22.3	450.0	279. 0	331.0	367.0	364.0	222. 0	8.2	7. 5	7. 5	7. 6	7.6	7.5	7.5	-	-	84.0
	09:0 0	57.721	25.3	24.6	22.2	21.2	22.6	20.5	230.0	217. 0	230.0	217.0	211.0	211. 0	8.5	8. 4	8. 4	8. 4	8.3	8.4	8.3	132.0	133.2	60.0
2	11:0 0	57.721	14.6	11.2	9.5	11.4	9.4	10.3	172.0	153. 0	158.0	155.0	158.0	151. 0	-	-	-	-	-	-	-	138.0	131.9	-
	13:0 0	57.721	17.8	17.0	15.8	14.0	14.5	13.3	180.0	153. 0	168.0	159.0	160.0	147. 0	8.5	8. 4	8. 4	8. 4	8.4	8.4	8.4	136.5	134.0	60.0

Anexo 7. Coeficientes de regresión del análisis estadístico Box-behnken

Coeficientes de regresión para la muestra con turbidez baja – Eficiencia de remoción de turbidez

Factor	Coeficiente de regresión	Std. Err Pure Err	t (4)	p
Mean/ Interc.	-1239.57	127.099	-9.753	0.0006
(1) Tiempo (min) (L)	30.17	5.005	6.029	0.0038
Tiempo (min) (Q)	-0.56	0.071	-7.909	0.0014
(2) Dosis (mg/L) (L)	24.30	5.005	4.856	0.0083
Dosis (Q) (mg/L)	-0.39	0.071	-5.457	0.0055
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	28.07	2.100	13.365	0.0002
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	-0.40	0.018	-22.625	0.0000
1L by 2L	-0.04	0.073	-0.598	0.5823
1L by 3L	0.07	0.036	1.793	0.1475
2L by 3L	0.02	0.036	0.598	0.5823

(*) p<0.05, efecto significativo

L=Lineal, Q=Cuadrático

Coeficientes de regresión para la muestra con turbidez baja – Eficiencia de remoción de color

Factor	Coeficiente de regresión	Std. Err Pure Err	t (4)	p
Mean/ Interc.	-277.15	24.039	-11.529	0.000
(1) Tiempo (min) (L)	3.86	0.947	4.079	0.015
Tiempo (min) (Q)	-0.08	0.013	-6.232	0.003
(2) Dosis (mg/L) (L)	8.18	0.947	8.643	0.001
Dosis (Q) (mg/L)	-0.11	0.013	-8.144	0.001
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	10.28	0.397	25.884	0.000
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	-0.13	0.003	-39.498	0.000
1L by 2L	-0.01	0.014	-0.745	0.497
1L by 3L	0.02	0.007	2.981	0.041
2L by 3L	-0.02	0.007	-3.354	0.028

(*) p<0.05, efecto significativo

L=Lineal, Q=Cuadrático

Coefficientes de regresión para la muestra con turbidez alta – Eficiencia de remoción de turbidez

Factor	Coefficiente de regresión	Std. Err Pure Err	t (4)	p
Mean/ Interc.	-322.70	8.87	-36.39	0.000
(1) Tiempo (min) (L)	1.46	0.20	7.31	0.002
Tiempo (min) (Q)	-0.02	0.00	-9.18	0.001
(2) Dosis (mg/L) (L)	12.75	0.27	46.59	0.000
Dosis (Q) (mg/L)	-0.12	0.00	-49.45	0.000
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	2.81	0.09	31.50	0.000
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	-0.03	0.00	-56.94	0.000
1L by 2L	-0.00	0.00	-0.91	0.413
1L by 3L	-0.00	0.00	-0.91	0.413
2L by 3L	-0.00	0.00	-1.83	0.142

(*) p<0.05, efecto significativo

L=Lineal, Q=Cuadrático

Coefficientes de regresión para la muestra con turbidez alta – Eficiencia de remoción de color

Factor	Coefficiente de regresión	Std. Err Pure Err	t (4)	p
Mean/ Interc.	-93.06	7.437	-12.51	0.0002
(1) Tiempo (min) (L)	1.04	0.168	6.21	0.0034
Tiempo (min) (Q)	-0.02	0.002	-9.26	0.0008
(2) Dosis (mg/L) (L)	4.92	0.230	21.44	0.0000
Dosis (Q) (mg/L)	-0.04	0.002	-22.75	0.0000
(3) Gradiente (S ⁻¹) (L)	2.16	0.075	28.83	0.0000
Gradiente (S ⁻¹) (Q)	-0.03	0.000	-57.08	0.0000
1L by 2L	-0.00	0.002	-0.60	0.5823
1L by 3L	0.00	0.001	1.79	0.1475
2L by 3L	0.00	0.001	0.60	0.5823

(*) p<0.05, efecto significativo

Anexo 8. Fotos del desarrollo del proyecto



Anexo 9. Plano general del replanteo de la planta de tratamiento – Vista de planta.